

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

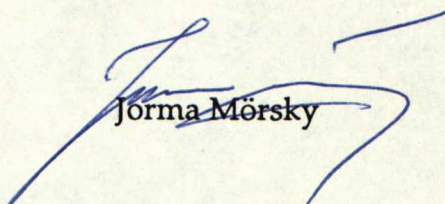
Sähkötekniikan osasto

Pasi Syrjälä

SÄHKÖENERGIAN MITTAAMISEN ONGELMAT

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 29.4. 1993.

Työn valvoja


Jorma Mörsky

19118

~~TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO~~

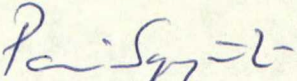
ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratoriossa. Työn taloudellisina tukijoina ovat olleet Enermet Oy, Hämeen Sähkö Oy, Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y. ja Teknillisen korkeakoulun Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorio, joille haluan lausua kiitokseni.

Eero Hassia, Teuvo Lahtea, Ilkka Salosta ja työn valvojaa, professori Mörskyä, kiitän työtä varten saamistani neuvoista.

Lisäksi haluan kiittää Jenni Syrjälää ja Ulla Syrjälää opintojeni tukemisesta ja kannustamisesta.

Espoossa huhtikuun 29. päivänä 1993


Pasi Syrjälä

Tekijä:	Pasi Syrjälä	
Työn nimi:	Sähköenergian mittaamisen ongelmat	
Päivämäärä:	29.4.1993	Sivumäärä: 55
Osasto:	Sähkötekniikan osasto	
Professuuri:	Svt-18 Sähkötekniikka (sähkölaitokset)	
Työn valvoja:	Professori Jorma Mörsky	
<p>Ympäristöolosuhteet, sähkön laatua heikentävät tekijät sekä mittausjärjestelyyn ja mitattavaan kohteeseen liittyvät ongelmat saattavat aiheuttaa ongelmia sähköenergian mittaamiseen.</p> <p>Eniten virhettä aiheuttavia ongelmia ovat jännitteen ja virran tasakomponentti ja yliaaltosisältö sekä epäonnistunut mittamuuntajien valinta. Uuden aikaiset, staattiset kWh-mittarit mittaavat monesti tarkasti niissäkin olosuhteissa, joissa induktiomittari mittaa virheellisesti.</p> <p>Virheen suuruus ja suunta kussakin tapauksessa riippuu mittarin ja virhettä aiheuttavien tekijöiden ominaisuuksista ja monista muista tekijöistä. Virheen täsmällinen suuruus eri tilanteissa on määriteltävä tapauskohtaisesti.</p>		
Avainsanat:	sähköenergian mittaaminen, kWh-mittari, mittamuuntaja	

Author:	Pasi Syrjälä
Name of the thesis:	Problems in electrical energy measurement
Date:	29.4.1993
	Number of pages: 55
Faculty:	Electrical engineering
Professorship:	Svt-18 Power systems engineering
Supervisor:	Professor Jorma Mörsky
<p>Environmental circumstances, factors which degrade the quality of electricity and problems related to organising the measurement or the nature of the load to be measured may cause problems in electrical energy measurement.</p> <p>The most important sources causing error are dc-biasing and harmonic content of voltage and current and failed selection of instrument transformers. In many situations the modern, static watthour meters manage to register correctly while the previous induction type watthour meters have relatively large errors.</p> <p>The magnitude and direction of the error is dependent of the properties of the meter, magnitude of the phenomenon and also many other things. The precise error has to be specified separately in each situation.</p>	
Key words:	electrical energy measurement, watthour-meters, instrument transformers

Sisällysluettelo:

Alkulause.....	i
Tiivistelmä.....	ii
Abstract.....	iii
Sisällysluettelo.....	iv
Symboli- ja lyhenneluettelo.....	vi
1 Johdanto	1
2 Sähköenergian mittaaminen	2
2.1 Yleistä	2
2.2 Mittauskytkennät.....	2
2.3 Induktiomittari	5
2.3.1 Induktiomittarin toimintaperiaate.....	5
2.3.2 Induktiomittarin säätö- ja virityselimet	7
2.3.3 Induktiomittarin ominaisuudet	8
2.4 Staattinen mittari.....	9
2.4.1 Yleistä.....	9
2.4.2 Elektronisen kWh-mittarin toimintaperiaate	9
2.4.3 Digitaalisen kWh-mittarin toimintaperiaate	10
2.4.4 Staattisten mittareiden virran ja jännitteen mittaust	10
2.4.5 Staattisen mittarin ominaisuudet.....	11
2.5 Mittamuuntajat.....	12
2.5.1 Yleistä.....	12
2.5.2 Jännitemuuntaja	13
2.5.3 Virtamuuntaja.....	14
3 Ympäristön vaikutus sähköenergian mittaamisen tarkkuuteen.....	15
3.1 Yleistä	15
3.2 Ympäristön lämpötilan vaikutus.....	15
3.2.1 kWh-mittarin lämpötilariippuvuus.....	15
3.2.2 Mittamuuntajien lämpötilariippuvuus	17
3.3 Ilman kosteuden ja koostumuksen vaikutus kWh-mittariin.....	17
3.4 Käyttöasennon ja värinän vaikutus kWh-mittariin	18
3.5 Ulkoisen magneettikentän vaikutus kWh-mittarin tarkkuuteen	18
3.6 Ilkivalta.....	19
4 Sähkön laatutekijöiden aiheuttamat ongelmat	20
4.1 Yleistä	20
4.2 Jännitteen tehollisarvon vaihtelu.....	20
4.3 Taajuuden poikkeaminen nimellisarvosta	21
4.4 Yliaaltojen vaikutus sähköenergian mittaamiseen	22
4.4.1 Yleistä.....	22
4.4.2 Yliaaltojen vaikutus induktiomittariin lineaarisella kuormalla.....	23
4.4.3 Yliaaltojen vaikutus induktiomittariin epälineaarisella kuormalla	24
4.4.4 Yliaaltojen vaikutus staattiseen mittariin	26
4.5 Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetriset tilat	26

4.5.1 Jännitteen tasakomponentti	27
4.5.2 Jännite-epäsymmetria	28
5 Mittaustavasta johtuvat ongelmat sähköenergian mittaamiseen	29
5.1 Yleistä	29
5.2 Virheellinen mittamuuntajan valinta	29
5.2.1 Virheellinen virtamuuntajan muuntosuhteen valinta	29
5.2.2 Virheellinen virtamuuntajan taakka	30
5.2.3 Virheellinen jännitemuuntajan taakka	31
5.3 Jännitehäviö jännitemuuntajan toisiopiirissä	32
5.4 Lisälaitteiden aiheuttama magneettikenttä	33
5.5 Mittarin ikääntyminen	34
5.5.1 Määräaikaishuollot	34
5.5.2 Näytetarkastusmenettely	35
5.5.3 kWh-mittareiden tarkastaminen	37
5.6 Mittarin rikkoontuminen	38
5.7 Virheellisesti suoritettu kytkentä	39
5.7.1 Käänteinen vaihejärjestys	41
6 Mitattavasta kohteesta aiheutuvat ongelmat	42
6.1 Remanenssivuo virtamuuntajan rautasydämessä	42
6.1.1 Remanenssivuon syntyminen virtamuuntajaan	42
6.1.2 Rautasydämen demagnetoituminen	43
6.1.3 Remanenssin vaikutus virtamuuntajan toimintaan	44
6.2 Pienten kuormien mittaaminen	44
6.3 Ylivirtojen vaikutus mittalaitteisiin	45
6.4 Kuormitusten epätasainen jakautuminen eri vaiheille	47
6.5 Virran tasakomponentti	48
7 Loppuyhteenveto	51
Lähdeluettelo	53

Symboli- ja lyhenneluettelo

A	poikkipinta-ala
A/D	analoginen/digitaalinen
B	magneettivuon tiheys
D_i	virran särö
f	taajuus
F_1, F_2	voima
F_s	todellinen mittarivarmuuserroin
F_{sb}	mittarivarmuuserroin nimellistaakalla
H	magneettikentän voimakkuus
I	virta
I_0	poikittaishaaran virta
I_1	ensiövirta
I_2	toisiovirta
I_{2b}	toisiovirran nimellisarvo
I_b	nimellis(perus)virta
I_{dc}	virran tasakomponentti
I_{dyn}	dynaaminen oikosulkuvirtakestoisuus
$i_k(t)$	virta ajan funktiona vaiheessa k
I_{max}	mittarin suurin sallittu jatkuva virta
I_{pu}	jännitekäämin aikaansaama pyörrevirta
I_{pi}	virtakäämin aikaansaama pyörrevirta
I_{rms}	virran tehollisarvo
I_{th}	terminen oikosulkukestoisuus
I_u	jännitekäämin virta
k, k_a, k_b	vakio
k_1, k_2	vakio
L	vaihejohdin
l	pituus
$L1, L2, L3$	kolmivaihejärjestelmän vaihejohtimet
m	vaiheiden lukumäärä
M	vääntömomentti
N	nollajohdin
N_1	ensiön johdinkierrosmäärä
N_2	toision johdinkierrosmäärä
P	pätöteho
P_d	yliaaltoteho
R	resistanssi
R_1	ensiökäämin resistanssi
R_2	toisiokäämin resistanssi
R_{Fe}	rautahäviöitä edustava resistanssi
S	taakka
S_b	nimellistaakka
S_2	sisätaakka
S_i	toisiotaakka

t	aika
T_b	pulssin jaksonaika
U	jännite
U/f	jännite/taajuus
U_1	ensiöjännite
U_2	toisiojännite
U_d	säröjännite
U_h	jännitehäviö
U_{Hall}	Hall-anturin jännite
$u_k(t)$	jännite ajan funktiona vaiheessa k
W	energia
W_{dc}	tasakomponentin energia
W_{kok}	todellinen kokonaisenergia
ΔW	energiaero (virhe)
X_1	ensiökäämin reaktanssi
X_2	toisiokäämin reaktanssi
X_m	magnetoimisreaktanssi
$Z_{\sigma 2}$	oikosulkuimpedanssi
α	ohjauskulma
$\Delta\alpha$	ohjauskulman virhe
Φ_i	virtakäämin indusoima magneettivuo
Φ_u	jännitekäämin indusoima magneettivuo
φ	jännitteen ja virran välinen vaihekulma
ρ	resistiivisyys
IEC	International Electrotechnical Commission
ind	induktiivinen
kap	kapasitiivinen
lk	tarkkuusluokka
p.u.	per unit
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SLY	Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y.

1 Johdanto

Sähköenergian kauppa on taloudellisesti erittäin merkittävää liiketoimintaa. Sähköenergiaa käytetään Suomessa noin 63 TWh vuodessa ja sen rahallinen arvo on useita miljardeja. Energia joudutaan mittaamaan useaan kertaan sen matkalla voimalaitoksesta kuluttajalle. Sähköenergian tuotannon ja jakelun kustannukset jaetaan kuluttajien kesken käyttäen erilaisia tariffeja, jotka pohjautuvat suurelta osin kulutetun tehon ja energian mittaamiseen.

Jotta kustannukset voitaisiin jakaa oikeudenmukaisesti, on kulutettu energia voitava mitata luotettavasti riittävällä tarkkuudella. Mittaamiseen tarvitaan tarkkoja mittalaitteita, joita on käytettävä asianmukaisella tavalla. Mittaustuloksen on oltava niin luotettava, että sen perusteella voidaan kiistatta määrittää kulutettuun sähköenergiaan verrannollinen osuus laskutuksessa. Sähköenergian mittaamisesta ei kuitenkaan saa koitua kohtuuttomia kustannuksia verrattuna kulutetun energian arvoon. Tästä syystä pienien energiamäärien mittauksessa sallitaan suurehko epävarmuus ja toisaalta suurten energiamäärien mittaamisesta aiheutuvat kustannukset voivat olla huomattavan suuria.

Työssä on tarkoituksena tutkia tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa ongelmia sähköenergian mittaamiseen. Työssä pyritään kartoittamaan mahdolliset ongelmat, selvittämään kunkin ongelman aiheuttaman virheen suuruusluokka ja virheeseen vaikuttavia tekijöitä ja vertaamaan virhettä standardeissa sallittuihin virheisiin. Käsiteltäviä ongelmaryhmiä ovat ympäristöolosuhteisiin, sähkön laatuun, mittausjärjestelyyn ja mitattavan kulutuksen ominaisuuksiin liittyvät ongelmat.

Työ perustuu sähköenergian mittaamisessa noudatettaviin standardeihin, määräyksiin ja suosituksiin sekä kotimaiseen kirjallisuuteen ja pääosin Yhdysvalloissa ja Iso-Britanniassa suoritettuun tieteelliseen tutkimukseen.

2 Sähköenergian mittaaminen

2.1 Yleistä

m-vaiheisessa sähkönjakelujärjestelmässä siirtynyt energia W aikavälillä $t_1 \dots t_2$ on:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{k=1}^m (u_k(t) \times i_k(t)) dt \quad (1)$$

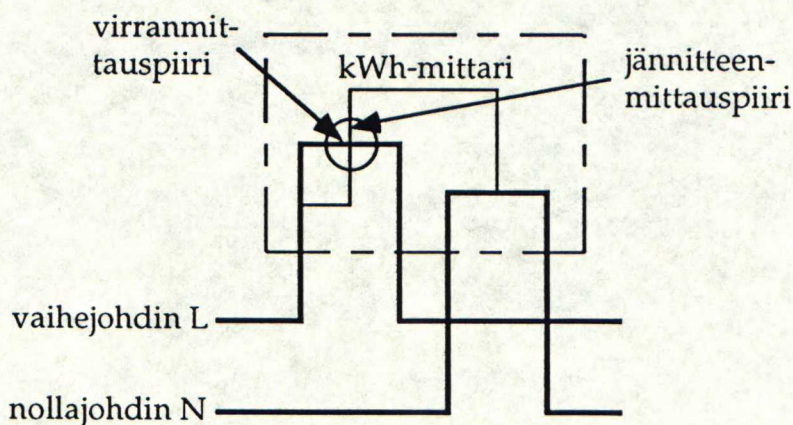
jossa:

m vaiheiden lukumäärä
 t aika
 $u_k(t)$ vaihejännitteet ajan funktiona
 $i_k(t)$ vaihevirrat ajan funktiona

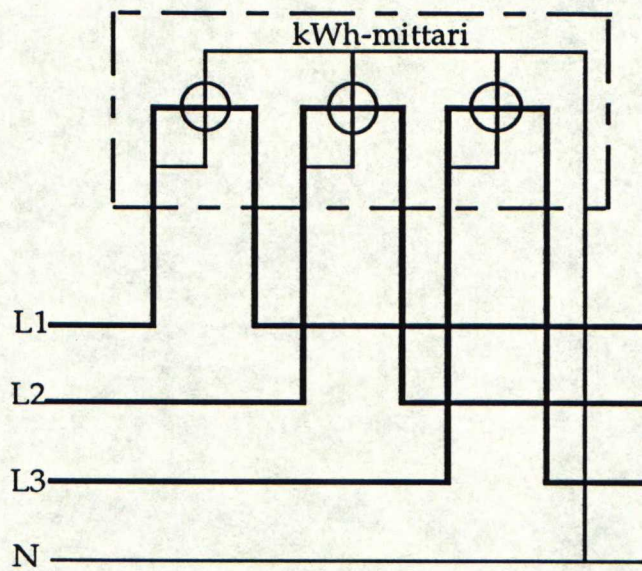
Sähköenergian mittaaminen vaihtosähköverkossa suoritetaan määrittämällä järjestelmässä siirtyvä teho sen virroista ja jännitteistä ja integroimalla sitä ajan suhteen.

2.2 Mittauskytkennät

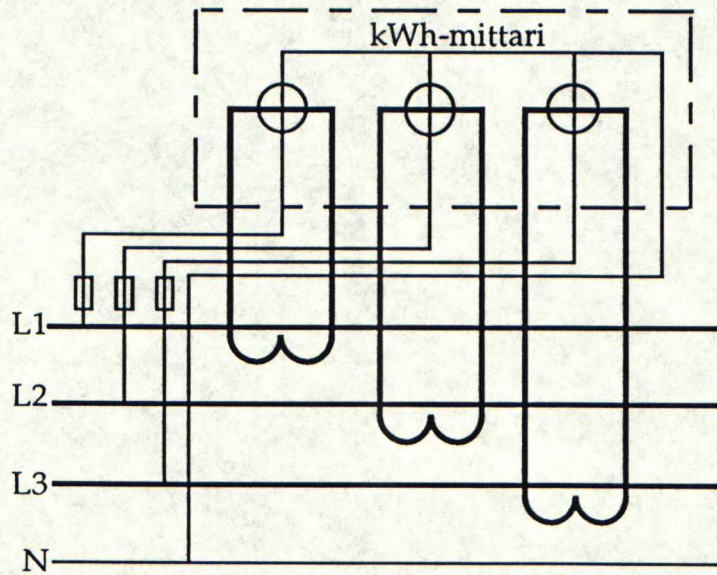
Tavallisimpia sähköenergia- eli kWh-mittarin kytkentävaihtoehtoja ovat seuraavat:



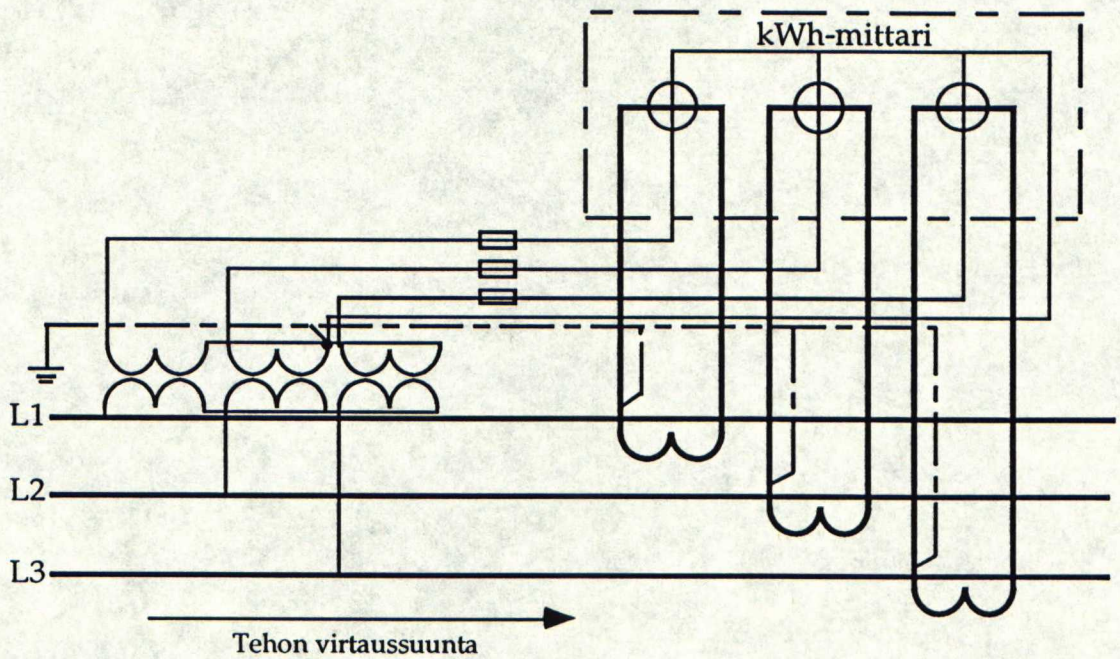
Kuva 1. Sähköenergian suora mittaaminen yksivaiheisesti.



Kuva 2. Sähköenergian suora mittaaminen kolmivaiheisesti.



Kuva 3. Sähköenergian mittaaminen kolmivaiheisesti, jännitteen mittaaminen suoraan, virran mittaaminen virtamuuntajien välityksellä.



Kuva 4. Sähköenergian mittaaminen kolmivaiheisesti, sekä jännitteen että virran mittaus mittamuuntajien välityksellä.

Sähköenergian mittaamista käsitteleviä standardeja ovat mm.

SFS 3381	Mittauslaitteistot
SFS 2874:E	Virtamuuntajat
SFS 3109:E	Jännitemuuntajat
IEC 521	Induktio-kWh-mittarit (tarkkuusluokat 2, 1 ja 0,5)
IEC 687	Staattinen kWh-mittari (tarkkuusluokat 0,5 S ja 0,2 S)*

IEC 1036 Staattinen kWh-mittari (tarkkuusluokat 2 ja 1)

*) Staattisten tarkkuusmittareiden virta-alue on laajennettu (S).

Valittaessa mittaria ja mittamuuntajaa energian mittaamiseen, mitattavan energian (oletettu) suuruus määrää tarvittavan tarkkuusluokan. Standardissa määrätään myös suurin sallittu jännitehäviö jännitemuuntajan toisiopiirissä (toisiojohdotuksen ja sen oikosulkusuojan yhteenlaskettu jännitehäviö).

Taulukko 1. Käytettävät mittareiden ja mittamuuntajien tarkkuusluokat vuosittaisen energiankulutuksen mukaan. [1].

Vuosittainen energiankulutus MWh	Mittarien tarkkuusluokka	Mittamuuntajien tarkkuusluokka	Suurin sallittu jännitehäviö/%
< 1 000	2	0,5	0,5
1 000...10 000	1	0,5	0,25
> 10 000	0,5	0,2	0,1

Hyvin suurten energiamäärien mittaamiseen käytetään lk 0,2 S mittareita.

Taulukko 2. kWh-mittarin suurimmat sallitut virheet eri tarkkuusluokissa. I_b = mittarin nimellisvirta, I_{max} = mittarin suurin sallittu virta. Suluissa olevat arvot koskevat luokkia 0,5 S ja 0,2 S [2], [3], [4].

Virta	Teho- kerroin	Virherajat %			
		lk 2	lk 1	lk 0,5 s	lk 0,2 s
$0,05(0,01) \times I_b$	1	$\pm 2,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,4$
$0,1(0,05) \times I_b \dots I_{max}$	1	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$
$0,1(0,02) \times I_b$	0,5 ind	$\pm 2,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$
$0,1(0,02) \times I_b$	0,8 kap	–	$\pm 1,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$
$0,2(0,1) \times I_b \dots I_{max}$	0,5 ind	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$
$0,2(0,1) \times I_b \dots I_{max}$	0,8 kap	–	$\pm 1,0$	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$
$0,2(0,1) \times I_b \dots I_b(I_{max})$	0,25 ind	–	$\pm 3,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$
$0,2(0,1) \times I_b \dots I_b(I_{max})$	0,5 kap	–	$\pm 2,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$

2.3 Induktiomittari

2.3.1 Induktiomittarin toimintaperiaate

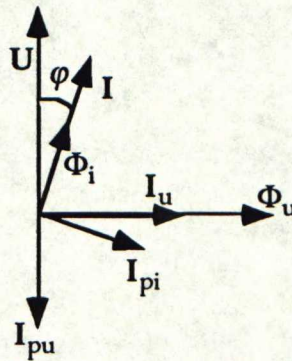
Yksinkertaisin vaihtosähköenergian mittaamiseen käytettävä mittari on induktio- eli ferrarismittari. Mittarin toimintaperiaatteen keksimisestä kun- nia kuuluu italialaiselle Galileo Ferrarille, joka vuonna 1888 totesi kehittä- mänsä sähkömoottorin soveltuvan parhaiten energiamittariksi. Vuotta myöhemmin onnistuttiin rakentamaan professori von Blathyn suunnitte- lemana ensimmäinen käyttökelpoinen induktiomittari Budapestissa.

Induktiomittari on sähkömoottori, jossa roottorina toimivaan pyöreään alumiinilevyyn syntyy mitattavaan tehoon verrannollinen vääntömo- mentti. Moottoria jarrutetaan pyörrevirtajarrun avulla siten, että jättämä on lähes 100%. Tiettyä tehoa vastaa täten tietty akselin kulmanopeus. Root- torin pyöriminen välitetään laskulaitteelle, josta mitattu energia luetaan.

Kolmivaiheissa mittarissa on samalla akselilla kolme koneistoa. Yksinker- taisuuden vuoksi tässä käsitellään yksivaiheisen mittarin (ts. yhden koneis- ton) toimintaperiaatetta. [5], [6].

Tarvittavan vääntömomentin saavat aikaan jännite- ja virtamagneetit. Jän- nitemagneetin muodostaa sen rautasydän eli jänniterauta ja sen ympärille käämitty ja kulutuksen rinnalle kytketty jännitekäämi. Käämissä kulkeva virta I_u saa aikaan magneettivuon Φ_u , joka kulkee roottorilevyn läpi. Vuo on 90° jäljessä jännitettä U . Levyn indusoituu magneettivuon vaikutuk- sesta pyörrevirtoja I_{pu} , joita voidaan (matemaattisessa mielessä) käsitellä virrallisina johdinsilmukoina. Pyörrevirrat ovat 90° jäljessä vuota ja 180° jäljessä jännitettä.

Virtamagneetin muodostavat virtamagneetin rautasydän eli virtarauta ja sen ympärille ja kuormituksen kanssa sarjaan kytketty virtakäämi. Virta- käämi saa aikaan virran I kanssa samanvaiheisen magneettivuon Φ_i , joka kulkee roottorilevyn läpi. Levyn läpäisemä vuo saa aikaan edelleen pyörre- virtoja I_{pi} , jotka ovat 90° jäljessä virtaa.



Kuva 5. Induktiomittarin virta- ja jännitejärjestelmän yhdistetty ja yksinkertaistettu vektoridiagrammi.

Kun virtamagneetin aikaansaama vuo on maksimissaan, on jännitemagneetin vuo 0 (jos $\varphi = 0^\circ$). Koska syntyneet pyörrevirrat ovat 90° jäljessä sitä vuota, joka saa po. virran aikaan, ovat jännitemagneetin luomat pyörrevirrat siis samalla hetkellä maksimissaan. Virrallisen johtimen voidaan siis ajatella olevan magneettikentässä, jolloin siihen vaikuttaa voima F_1 .

$$F_1 = \Phi_i I_{pu} k_a \quad (2)$$

Kun $\varphi \neq 0^\circ$ saadaan:

$$F_1 = \Phi_i I_{pu} \cos \varphi k_a \quad (3)$$

missä:

Φ_i = virtakäämin aikaansaama magneettivuo

I_{pu} = jännitekäämin aikaansaaman magneettivuon indusoima pyörrevirta

k_a = vakio

$\cos \varphi$ = kuormituksen tehokerroin

Vastaavasti jännitemagneetin aikaansaama vuo ja virtamagneetin aiheuttamat pyörrevirrat aiheuttavat voiman F_2 .

$$F_2 = \Phi_u I_{pi} \cos \varphi k_b \quad (4)$$

missä:

Φ_u = jännitekäämin aikaansaama magneettivuo

I_{pi} = virtakäämin aikaansaaman magneettivuon indusoima pyörrevirta

k_b = vakio

Vakiot k_a ja k_b edustavat pyörrevirtojen kulkeman matkan vastakkaisen kentän lävitse ja po. kentän poikkipinta-alan tuloa. Voimat F_1 ja F_2 aiheuttavat roottorilevyyn vaikuttavan vääntömomentin M :

$$M = k_1 F_1 + k_2 F_2 \quad (5)$$

jossa vakioissa k_1 ja k_2 on edelleen otettu huomioon mittarin rakenteesta johtuvia tekijöitä.

Jotta vakiokuormituksella vääntömomentti ei aiheuttaisi pyörimisnopeuden jatkuvaa kiihtymistä, on roottoria jarrutettava pyörimisnopeuteen verrannollisella vastamomentilla. Tämä saadaan aikaan kestopagneetilla, joka asennetaan siten, että levy pyörii magneetin napojen välissä.

2.3.2 Induktiomittarin säätö- ja virityselimet

Käämien resistanssien, hajareaktanssien, laakerien kitkan, magneettilevyjen epäideaalisuuden, lämpötilan ja muiden seikkojen aiheuttamien virheiden kompensoimiseksi induktiomittarissa on lukuisia säätö- ja virityselimä [5]. Näistä tärkeimpiä ovat:

Oikosulkurenkaat, jotka eliminoivat laskulaitteen ja laakerien aiheuttamaa kitkaa. Oikosulkurenkaiden avulla saadaan aikaan ns. jännitekäyttö, joka aiheuttaa ainoastaan jännitteestä riippuvaisen lisävääntömomentin.

Jarruhaka ja pysäyttäjä estävät mittarin pyörimisen ilman kuormaa jännitekäytön aiheuttaman momentin seurauksena. Sopivasti asetetut jarruhaka ja pysäyttäjä toimivat magneettijarruna, joka pysäyttää ankkurin niin, että ankkurin punainen merkki jää ikkunan kohdalle.

Jänniteikeen paikkaa siirtämällä säädetään vaihesiirtoa.

Pienen kuorman säätökielellä säädetään jännitekäytön suuruutta.

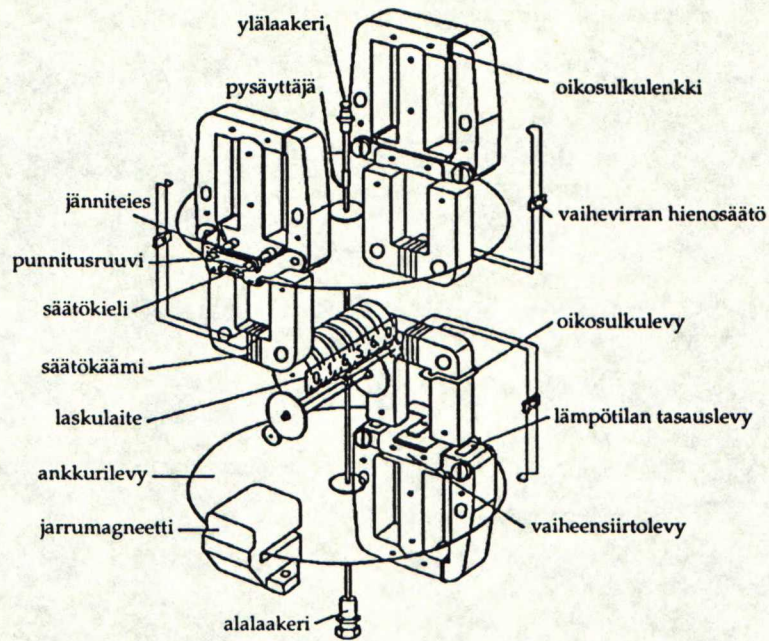
Vaiheensiirtolevy viivyyttää jännitejärjestelmän vuota siten, että sen vaihe-ero on oikea virtajärjestelmän vuohon nähden. Näin mittari ottaa oikealla tavalla huomioon perustaajuisen jännitteen ja virran vaihe-eron.

Virtaies kompensoi magneettilevyjen epäideaalisuutta. Suurilla virroilla vuo ohjautuu virtaikkeeseen, jolloin virtaraudan kyllästyminen estyy. Pie-nillä virroilla virtaicken rakolevyt estävät vuon ohjautumisen virtaikkeeseen. Virtaicken oikosulkurengas kuormittaa virtaicken vuota ja suurentaa käyttövuota pienillä kuormilla.

Vaiheensiirron säätöelimien avulla kompensoidaan raaka-aineiden ominaisuuksien ja osien mittapoikkeamien vaihtelun aiheuttamaa virhettä vaihesiirtoon.

Punnitusruuveilla säädetään kolmivaiheisen mittarin jännitejärjestelmän vuoarvot samansuuruisiksi niin, että eri vaiheiden käyttöjärjestelmien vääntömomentit ovat samat.

Kolmivaiheisessa mittarissa on usein kaksi ankkurilevyä siten, että kaksi käyttöjärjestelmää vaikuttaa toiseen levyyn ja yksi käyttöjärjestelmä toiseen levyyn. Kun yhdellä levyllä kaksi käyttöjärjestelmää vaikuttaa samaan levyyn, on niiden sijaittava symmetrisesti ankkuriin nähden. Mikäli mittari on viritetty mittaamaan oikein tietyllä vaihejärjestyksellä, aiheuttaa käännetty vaihejärjestys ns. vaihejärjestysvirheen, kun symmetria ei olekaan täydellinen. Virhe voidaan korjata siirtämällä toista käyttöjärjestelmää ankkurilevyyn nähden.

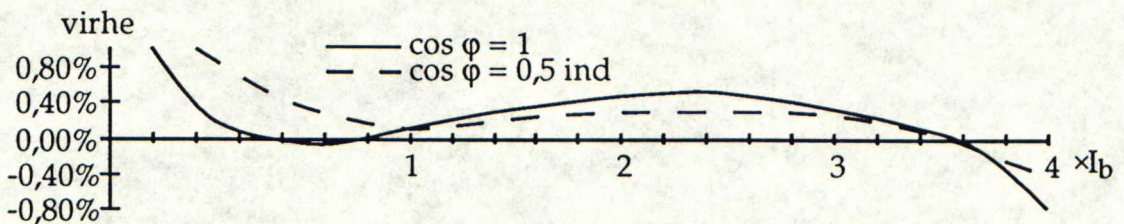


Kuva 6. Kolmivaiheisen induktiomittarin koneisto.

2.3.3 Induktioimittarin ominaisuudet

Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellisvaihejännite	
–suoraan kytkettävässä mittarissa	220 V
–mittamuuntajaliitännässä	$100/\sqrt{3}$ V
Nimellisvirrat (I_b)	
–suoraan kytkettävissä mittareissa	5...50 A
–mittamuuntajaliitännässä	1 tai 5 A
Maksimivirta (I_{max})	$2...4 \times I_b$

Virhe kuormituksen funktiona:



Kuva 7. Induktioimittarin virhe kuormituksen funktiona.

Omakulutus

- jännitepiirissä (vaihetta kohti nimellisjännitteellä)
0,8...1,2W, 4...6 VA
- virtapiirissä (vaihetta kohti nimellisvirralla)
0,2...1,4W, 0,4...2,8 VA

Oikosulkukestoisuus

$-I_b = 10 \text{ A}$

$-I_b > 10 \text{ A}$

300 A

$20 \times I_b$

2.4 Staattinen mittari

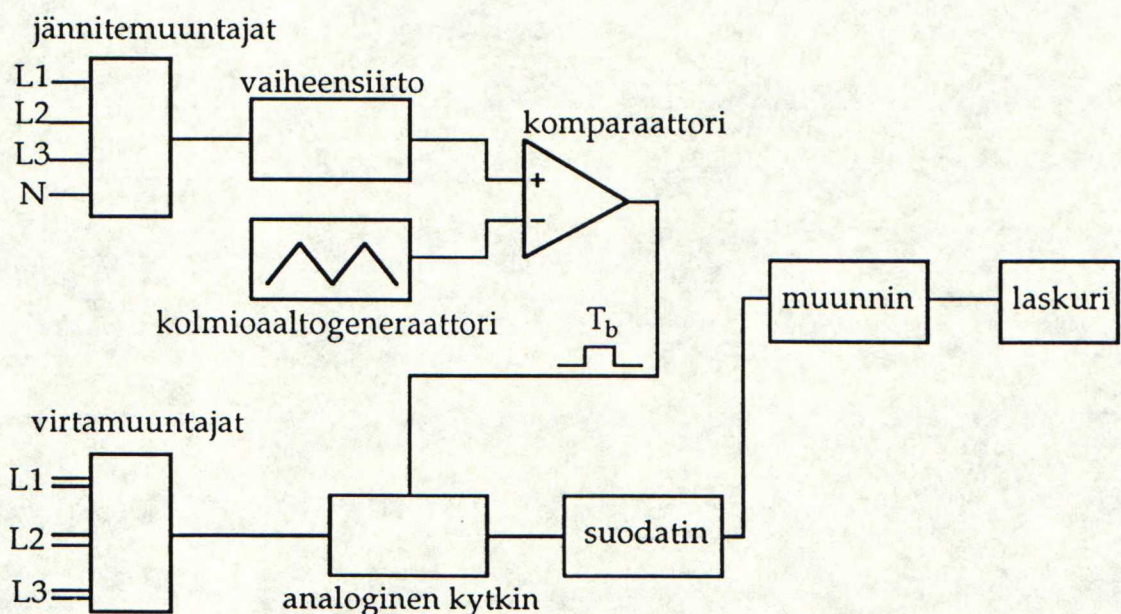
2.4.1 Yleistä

Elektroniikan komponenttien hintojen laskun myötä energiamittareiden valmistajat ovat siirtyneet perinteisten induktiomittareiden valmistuksesta tekemään staattisia mittareita. Esimerkiksi Suomessa induktiomittarin valmistus on lopetettu kokonaan.

Staattisten kWh-mittareiden toiminta voi perustua useisiin eri periaatteisiin. Päätyypit ovat 2. sukupolven elektroniset ja 3. sukupolven digitaaliset mittarit.

2.4.2 Elektronisen kWh-mittarin toimintaperiaate

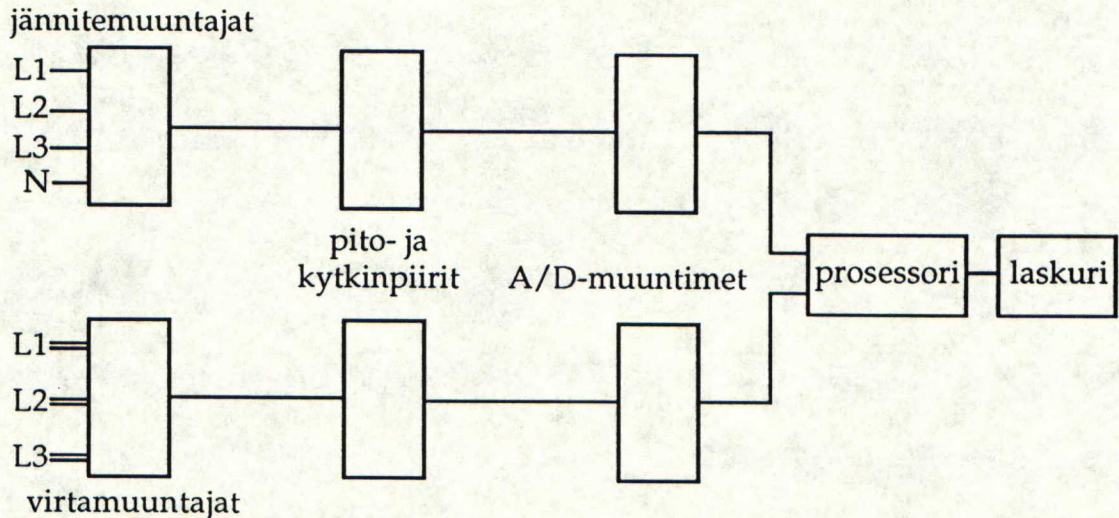
Elektroninen kWh-mittari perustuu useimmiten pulssinleveys - pulssin korkeus -modulaatioon [5]. Mittarin koneisto liittyy mitattavaan piiriin mitamuuntajien välityksellä. Pulssinleveysmodulaattorissa (kuva 8) muodostetaan pulssi, jonka leveys T_b on verrannollinen jännitteen suuruuteen. Pulssi ohjaa analogista kytkintä siten, että suodattimeen menee pulssijono, jonka leveys on verrannollinen jännitteeseen ja pulssin korkeus verrannollinen virtaan. Suodatin muodostaa pulssijonon pinta-alaan verrannollisen tasajännitteen, joka edelleen muutetaan laskurin askelmoottoria ohjauksi pulssijonoksi virta/taajuus-muuntimessa.



Kuva 8. Pulssinleveys - pulssinkorkeus -modulaatioon perustuvan kWh-mittarin periaatekaavio.

2.4.3 Digitaalisen kWh-mittarin toimintaperiaate

Elektronisen mittarin tapaan digitaalisen mittarin koneisto liittyy mitattavaan piiriin mittamuuntajien välityksellä. Signaalin arvo otetaan halutulla hetkellä talteen pitopiiriin ja ohjataan edelleen A/D-muuntimeen (kuva 9). Pitopiirin avulla varmistutaan siitä, että signaalit muunnetaan täsmälleen samanaikaisesti [7].



Kuva 9. Digitaalisen kWh-mittarin periaate.

Digitaalisen mittarin keskeisin komponentti on mikroprosessori, joka laskee mitattavan energian A/D-muuntimien antaman binäärisen informaation perusteella sekä ohjaa jännitteen ja virran mittausta, näyttöä sekä muita piirejä.

Perusmittausohjelmiston lisäksi mittariin voidaan ohjelmallisesti lisätä useita lisätoimintoja, esimerkiksi:

- tehokertoimen mitta
- virran ja jännitteen erillismittaus
- lois- ja näennäisenergian mitta
- 15 tai 60 min keskitehon mitta
- mittarin toiminnan tarkkailu ja ikääntymisen vaikutuksen kompensointi

2.4.4 Staattisten mittareiden virran ja jännitteen mitta

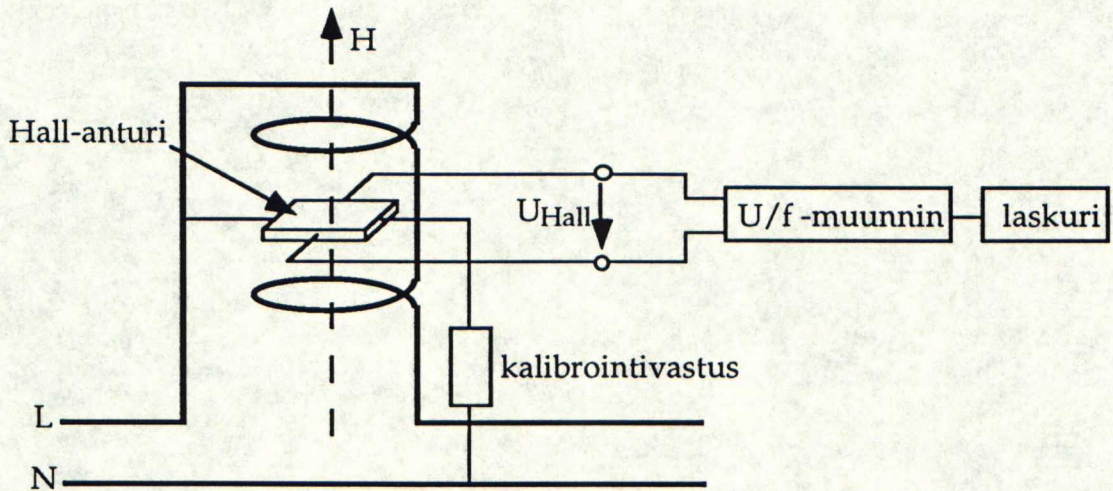
Mittamuuntajien sijasta staattisissa mittareissa voidaan käyttää muitakin menetelmiä virran ja jännitteen mittaamiseen. Virran mittaamiseen käytetään virtashunttia ja jännitteen mittaamisessa vastuksista rakennettua jännitteenjakajaa.

Sekä jännitteen että virran mitta

Magneettikentässä olevaan virralliseen johteeseen (tai puolijohteeseen) muodostuu jännite U_{Hall} , jonka suuruus on verrannollinen magneettikentän voimakkuuteen H ja johteessa kulkevaan virtaan I [8]:

$$U_{\text{Hall}} = k (H \times I); \quad (k \text{ on vakio}) \quad (6)$$

Hall-anturin avulla voidaan rakentaa teho- tai energiamittari asettamalla Hall-anturi (puolijohdepala) mitattavaan virtaan verrannolliseen magneettikenttään ja johtamalla mitattavaan jännitteeseen verrannollinen virta palkan lävitse (kuva 10) [9]. Tällöin Hall-anturiin muodostuu yhtälön (6) mukainen hetkellistehoon verrannollinen jännite. Jännitepiirissä voidaan käyttää esimerkiksi kalibrointivastusta säätämään anturin läpi menevää virta sopivalle tasolle.



Kuva 10. Hall-anturiin perustuvan kWh-mittarin toimintaperiaate.

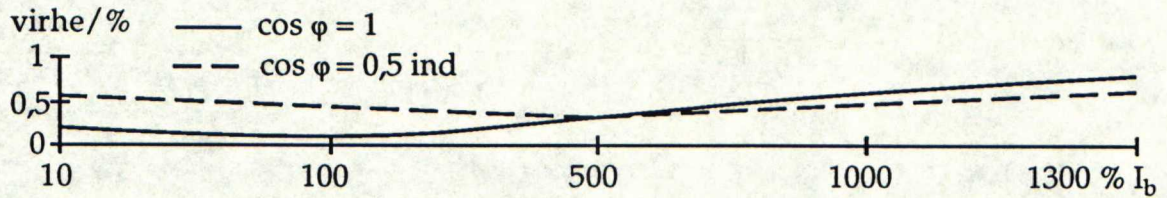
Tehoon verrannollisesta jännitteestä U_{Hall} saadaan laskettua energia muodostamalla jännitteestä pulssijono jännite/taajuus -muuntimessa ja ohjaamalla tällä pulssijonolla energiankulutusta osoittavaa laskuria.

2.4.5 Staattisen mittarin ominaisuudet

Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellisvaihejännite	
–suoraan kytkettävässä mittarissa	230 V
–mittamuuntajaliitännässä	$100/\sqrt{3}$ V
Nimellisvirrat (I_b)	
–suoraan kytkettävissä mittareissa	10 A
–mittamuuntajaliitännässä	1 tai 5 A
Maksimivirta (I_{max})	$6,5 \times I_b$
Omakulutus	
–jännitepiirissä vaihetta kohti nimellisjännitteellä:	

- erillinen apujännite (lk 0,5 S ja 0,2 S) 0,05...0,1 VA*
- ei erillistä apujännitettä (lk 1 ja 2) 0,5 W; 5 VA
- virtapiirissä (vaihetta kohti nimellisvirralla) 0,1...0,2 VA*
- *) tehokerroin ≈ 1

Staattisen mittarin kuormituskäyrä on tasainen huomattavasti suuremmalla virta-alueella kuin induktiomittarin:



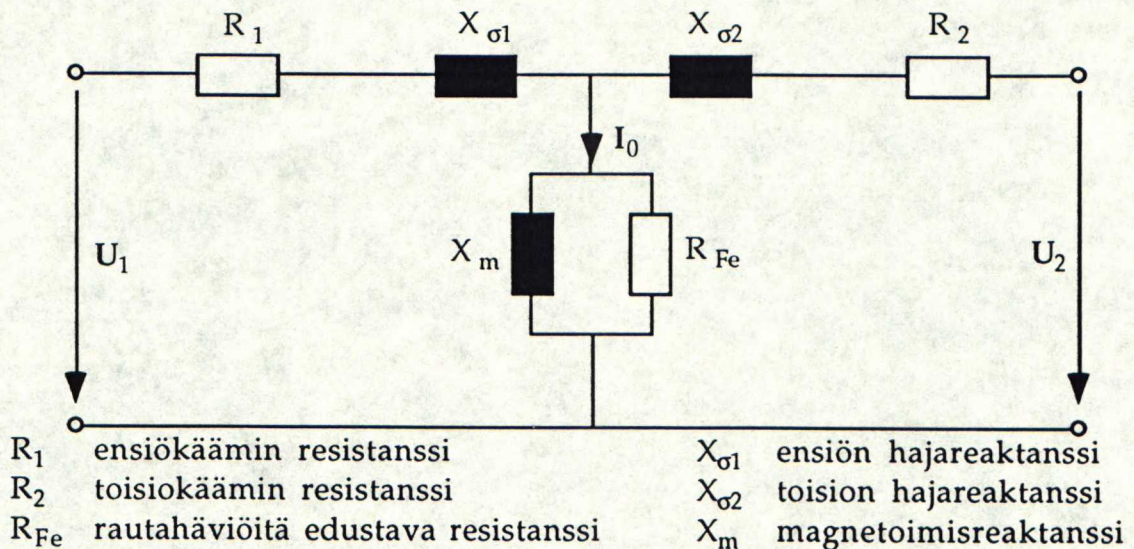
Kuva 11. Staattisen mittarin virhe kuormituksen funktiona [5].

2.5 Mittamuuntajat

2.5.1 Yleistä

Mittamuuntajien tarkoituksena on muuntaa ensiöpiirin suuret jännitteet ja virrat mittareille sopiviksi. Tällöin voidaan kaikilla jännite- ja virtataasoilla käyttää samoja, standardoituja mittareita. Mittamuuntaja katkaisee myös ensiö- ja toisiopiirien galvaanisen yhteyden. Mittamuuntajia on kahda tyyppiä: jännitteiden muuntamiseen tarkoitettuja jännitemuuntajia ja virtojen muuntamiseen tarkoitettuja virtamuuntajia. Sähkönjakeluverkossa käytetään sekä jännite- että virtamuuntajina induktiivisia mittamuuntajia. Mittareiden sisällä mahdollisesti olevat mittamuuntajat ovat toiminnaltaan samankaltaisia erillisten mittamuuntajien kanssa, joskin fyysisiltä mittasuhteiltaan ja sähköisiltä arvoiltaan huomattavasti pienempiä.

Mittamuuntajan toimintaa kuvataan sijaiskytkennän avulla:



Kuva 12. Jännitemuuntajan sijaiskytkentä.

Muuntajan toisionapoihin muodostuu ensiöjännitteeseen verrannollinen jännite. Jännitteiden suhteen määrää ensiö- ja toisiokäämien kierroslukujen suhde. Napojen välillä kulkevien virtojen suhde on kääntäen verrannollinen samaan suhteeseen:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (7)$$

Muuntajien poikittaishaaran impedanssit X_m ja R_{Fe} (kuva 12) ovat hyvin suuria muihin impedansseihin verrattuna. Tällöin virta I_0 on pieni ja yhtälön (7) yhtäsuuruus on likipitään voimassa.

2.5.2 Jännitemuuntaja

Jännitteen mittaamiseen käytetään yksivaiheisia, rautasydämissä muuntajia. Eristeaineena käytetään öljykyllästeistä paperia tai valuhartsia.

Jännitemuuntajan keskeisiä arvoja ovat ensiö- ja toisiojännitteiden nimellisarvot, taakka ja tarkkuusluokka.

Keskijänniteverkossa ensiövaihejännitteen nimellisarvot ovat $20/\sqrt{3}$ kV ja $10/\sqrt{3}$ kV, toisiovaihejännitteinä on $100/\sqrt{3}$ V. Mittaustarkoitukseen tarkoitetun muuntajan taakka on tyypillisesti varsin pieni; 10...25 VA. Käytettävät tarkkuusluokat ovat 0,5, 0,2 ja 0,1.

Jännitemuuntajan virhe on (kuvan 12 merkinnöillä) [10]:

jännitevirhe f_u :

$$f_u = \frac{U_2 - U_1'}{U_2} \approx \frac{R_1' - R_2}{R_L} - \frac{R_1'}{R_{Fe}} - \frac{X_{\sigma 1}' - X_{\sigma 2}}{X_L} - \frac{X_{\sigma 1}'}{X_m} \quad (8)$$

ja kulmavirhe δ_u :

$$\delta_u = \arg(U_2) - \arg(U_1') \approx \frac{R_1' - R_2}{X_L} - \frac{R_1'}{X_m} - \frac{X_{\sigma 1}' - X_{\sigma 2}}{R_L} - \frac{X_{\sigma 1}'}{R_{Fe}} \quad (9)$$

missä heittomerkillä merkityt suureet tarkoittavat toisioon redusoituja arvoja ja R_L ja X_L taakan resistanssia ja reaktanssia.

Taulukko 3. Jännitemuuntajan suurimmat sallitut virheet mittaustarkoituksiin käytettävissä tarkkuusluokissa. [10].

Luokka	Virhe	
	jännite $\pm \%$	kulma $\pm \text{min}$
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20

Induktiivisen jännitemuuntajan sijaiskytkennän suureet ovat taajuudesta riippuvaisia. Muuntaja on mitoitettu toistamaan oikein nimellistaajuista jännitettä. Sähköverkossa esiintyvät yliaallot toistuvat siten hieman eri tavalla ts. varsinainen muuntosuhde ei pidä niille paikkaansa. Ensioisignaalin tasakomponentti ei toistu lainkaan toisiopuolella, mutta kyllästää helposti rautasydämen.

2.5.3 Virtamuuntaja

Virtamuuntajat ovat jännitemuuntajien tapaan joko paperi- tai valuhartsieristeisiä, joskin nykyään sähkönjakeluverkossa käytetään useimmiten valuhartsieristeisiä virtamuuntajia. Monasti virtamuuntajassa ei ole varsinaista ensiökäämiä, vaan ensiökääminä toimii sydämen läpi kulkeva kaapeli tai kisko. Taipuisa kaapeli voidaan kuitenkin kiertää sydämen ympäri useita kertoja haluttaessa muuttaa muuntajan muuntosuhdetta.

Virtamuuntajien tyypillisiä teknillisiä arvoja jakeluverkossa ovat:

-nimellisjännite	0,6/12/24 kV
-nimellisenävirta	5...6 000 A
-nimellistoisiovirta	1 tai 5 A
-nimellistaakka	2,5...60 VA
-tarkkuusluokka	0,1 / 0,2 / 0,5
-mittarivarmuuskerroin	5 tai 10

Virtamuuntajan virhe on (kuvan 12 merkinnöillä) [10]:

virtavirhe f_i :

$$f_i = \frac{I_2 - I_1'}{I_2} \approx \frac{R_2 - R_L}{R_{Fe}} - \frac{X_{\sigma 2} - X_L}{X_M} \quad (10)$$

ja kulmavirhe δ_i :

$$\delta_i = \arg(I_2) - \arg(I_1') \approx \frac{R_2 - R_L}{X_M} - \frac{X_{\sigma 2} - X_L}{R_{Fe}} \quad (11)$$

Taulukossa (4) on esitetty standardeissa virtamuuntajille sallitut virta- ja kulmavirheet:

Taulukko 4. Virtamuuntajan suurimmat sallitut virheet mittaustarkoituksiin käytettävissä tarkkuusluokissa [10].

Luokka	Virtavirhe \pm %					Kulmavirhe \pm min				
	$I = I_b \times$					$I = I_b \times$				
	0,01	0,05	0,2	1	1,2	0,01	0,05	0,2	1	1,2
0,1		0,4	0,2	0,1	0,1		15	8	5	5
0,2		0,75	0,35	0,2	0,2		30	15	10	10
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5		1,5	0,75	0,5	0,5		90	45	30	30
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

3 Ympäristön vaikutus sähköenergian mittaamisen tarkkuuteen

3.1 Yleistä

Sähkönjakeluverkossa sähköenergiaa mitataan hyvin erilaisissa olosuhteissa. Useimmiten mittalaitteisto sijaitsee sisätiloissa, eikä se ole alttiina haitallisille ympäristötekijöille. Toisinaan kuitenkin mittaus suoritetaan ulkosalla tai tiloissa, joissa ilma voi sisältää huomattavia määriä epäpuhtauksia. Mittalaitteet on suunniteltu ja viritetty toimimaan oikein standardiolosuhteissa. Normaaaleista poikkeavat olosuhteet heikentävät mittaustuloksen tarkkuutta.

3.2 Ympäristön lämpötilan vaikutus

3.2.1 kWh-mittarin lämpötilariippuvuus

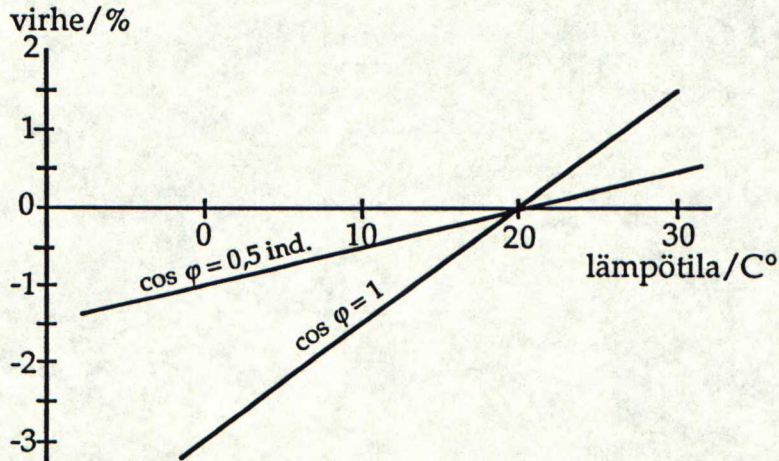
Standardeissa on määrätty suurin sallittu lämpötilasta aiheutuva lisävirhe kWh-mittareiden tarkkuuteen, taulukko (5). Standardeissa ei anneta määryksiä kWh-mittarin tarkkuudesta 13°C lämpötilan alapuolella eikä 33°C yläpuolella.

Taulukko 5. Suurin sallittu lämpötilasta aiheutuva lisävirhe astetta kohden lämpötila-alueella 13°C...33°C, vertailulämpötila 23°C. [2], [3], [4].

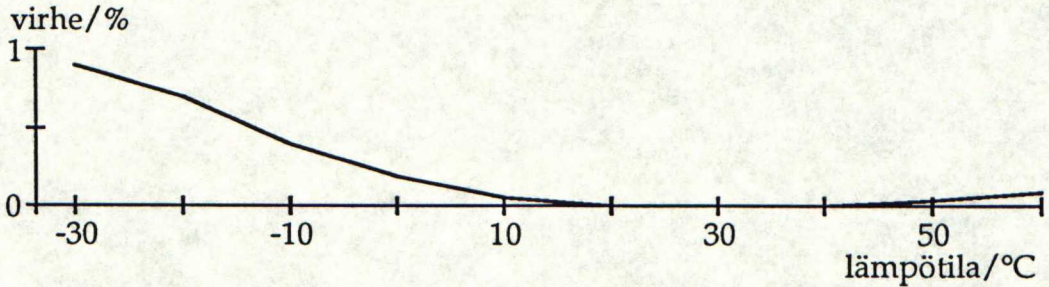
Virta	$\cos \varphi$	lk 2	lk 1	lk 0,5 S	lk 0,2
$0,1 \times I_b \dots I_{\max}$	1	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,05\%$	-	-
$0,2 \times I_b \dots I_{\max}$	0,5	$\pm 0,15\%$	$\pm 0,07\%$	-	-
$0,05 \times I_b \dots 1,2 \times I_b$	1	-	-	$\pm 0,03\%$	$\pm 0,01\%$
$0,1 \times I_b \dots 1,2 \times I_b$	0,5	-	-	$\pm 0,05\%$	$\pm 0,02\%$

Induktiomittarissa on useita osia ja rakenteita, joiden ominaisuudet ovat riippuvaisia lämpötilasta. Käämien, oikosulkurenkaiden ja ankkurilevyn resistanssit kasvavat lämpötilan kasvaessa. Jarrumagneetin ja käyttövuojärjestelmien ilmapäälit sekä rautasydämen resistanssi ja permeabiliteetti muuttuvat ja jarrumagneetin remanenssivuontiheys pienenee lämpötilan kasvaessa. Näiden lämpötilariippuvuuksin seurauksena lämpötilakompensoimaton induktiomittari mittaa virheellisesti (kuva 13) [5].

Induktiomittarin lämpötilakompensointi suoritetaan ns. lämpökompensointipaloja käyttäen. Lämpökompensointipalat ovat magneettista materiaalia, jonka permeabiliteetti muuttuu huomattavasti voimakkaammin kuin normaalien rautasydämissä käytettävien rautalaatujen. Ne asetetaan käyttöjärjestelmän magneettipiiriin ilmapäälisiin. Lämpötilan muuttuessa lämpökompensointipalojen permeabiliteetin muuttuminen kompensoi sydämen permeabiliteetin muutoksen (kuva 14).

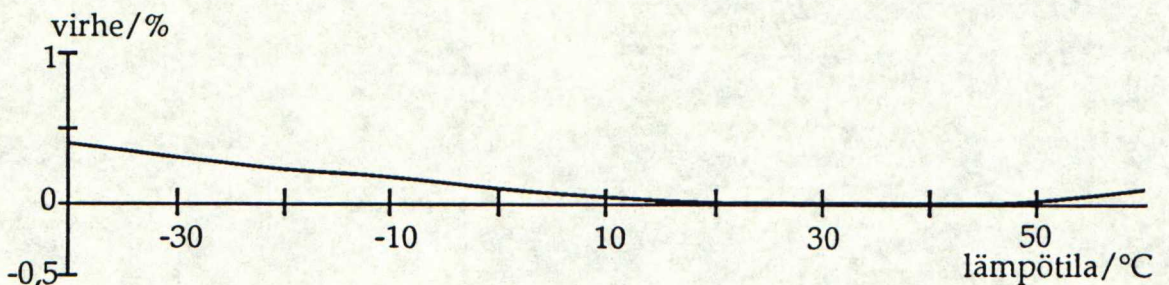


Kuva 13. Lämpötilakompensoimattoman induktiomittarin lämpötilariippuvuus.



Kuva 14. Lämpötilakompensoidun induktiomittarin lämpötilariippuvuus (lk 2, $\cos \varphi = 1$, $I = I_b$).

Staattisen mittarin lämpötilariippuvuus johtuu osin samoista, osin eri syistä kuin induktiomittarilla. Jännite- ja virtamuuntajien käämien ja rautasydämien ja jännitteenjakoetjun vastusten ominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa. Myöskin elektronisten ja digitaalisten komponenttien toiminta on – ainakin jossakin määrin – riippuvainen toimintalämpötilasta. Mitään osien lämpölaajenemisesta johtuvia ilmayälien muutoksia staattisissa mittareissa ei tietenkään tapahdu. Staattisen mittarin lämpötilariippuvuus on riippuvainen mittariin valittujen komponenttien ominaisuuksista, erään staattisen mittarin lämpötilariippuvuus on esitetty kuvassa (15). Useimmat staattiset mittarit mittaavat hieman liikaa kylmissä lämpötiloissa.



Kuva 15. Staattisen (pulssinleveys-pulssinkorkeus -modulaatioon perustuvan) mittarin lämpötilariippuvuus (lk 2, $\cos \varphi = 1$, $I = I_b$).

Kuten kuvista (14) ja (15) nähdään, matalissa lämpötiloissa kWh-mittari mittaa liikaa. Tästä syystä kWh-mittari tulisi sijoittaa sisätiloihin. Erityisen tärkeätä tämä on silloin, kun mitattava energiamäärä on suuri ja käytetään tarkkuusluokkien 1...0,2 mittareita, jolloin tarkka tulos on kyseessä olevan sähköenergian suuren rahallisen arvon takia tärkeä.

3.2.2 Mittamuuntajien lämpötilariippuvuus

Mittamuuntajan käämin resistanssi ja sydämen permeabiliteetti ovat jonkin verran riippuvaisia lämpötilasta. Mittamuuntajastandardeissa on määrätty mittamuuntajien toimintalämpötila-alueeksi sisälle sijoitettavilla muuntajilla -5...40 °C ja ulos sijoitettavilla -40...40 °C [11], [12].

Lämmittämättömään sisätilaan on valittava mittamuuntajat, jotka kestävät hyvin kylmyyttä. On myös huomattava, että suoralle auringon säteilylle alttiina oleva muuntaja voi lämmetä hyvinkin kuumaksi.

Lämpötilan vaihtelu vaikuttaa eniten käämien resistansseihin (sisätaakkaan). Lämpötilan ei ole – mittaustarkkuuden rajoissa – havaittu vaikuttavan mittamuuntajien tarkkuuteen.

3.3 Ilman kosteuden ja koostumuksen vaikutus kWh-mittariin

Ilman kosteudelle ja koostumukselle ei ole esitetty mittaristandardeissa vaatimuksia mittareiden tarkkuuteen lämpötilan tapaan. On vain määrätty joitakin rajoja ilman suhteelliselle kosteudelle, joissa olosuhteissa mittarin tulee pysyä luokassaan:

Taulukko 6. Ilman suhteellisen kosteuden suurimmat sallitut arvot mittarin sijoituspaikalla. [4].

aika	kosteus
30 päivänä	<95%
muina päivinä	<85%
vuosikeskiarvo	<75%

Suomessa ei esiinny juurikaan yli 93% ilman suhteellisen kosteuden arvoja, vuosikeskiarvo sitä vastoin on noin 80%. Ilman kosteuden ei ole kuitenkaan havaittu vaikuttavan mittaustarkkuuteen eikä mittarin ikääntymiseen. Mittarit olisi varmuuden vuoksi ehkä sijoitettava sisätiloihin, joissa ilman suhteellinen kosteus on pienempi kuin ulkosalla.

Ilman sisältämille epäpuhtauksille (pöly, erilaiset kaasut) ei standardeissa ole esitetty määräyksiä. Mittarivalmistajat kuitenkin suosittelevat huoltamaan mittarit normaalia useammin sijoituspaikan ollessa epäsuotuisa, esimerkiksi syövyttävien kaasujen vaikutuspiirissä.

Mitään täsmällisiä huoltovälejä ei ole kuitenkaan syytä määritellä, ovathan olosuhteet aina tapauskohtaiset. Näinollen olosuhdetekijät huomioon otta-va huoltoväli on syytä valita nojautuen kokemuseräiseen tietoon mittarin tarkkuuden säilymisestä.

Ilman kosteus ja epäpuhtaudet vaikuttavat eniten mittareiden liikkuviin osiin. Koska eri mittarityypeistä staattisissa mittareissa on olennaisesti vähiten liikkuvia osia ja nekin ovat kestäväää muovia (laskurissa), on näiden tekijöiden vaikutus staattiseen mittariin pienempi kuin induktiomittariin.

3.4 Käyttöasennon ja tärinän vaikutus kWh-mittariin

Käyttöasennolla on suuri vaikutus induktiomittarin toimintaan. Vinoon asentoon asennettuna laakerien kitkan muutos aiheuttaa virhettä mittarin näyttämään. Staattisen mittarin tarkkuuteen käyttöasento ei vaikuta.

Mittaristandardissa IEC 521 sallitaan mittarin vinoon ripustamisesta aiheutuva lisävirhettä taulukon (7) mukaisesti. Vinous mitataan asteina pystysuoraan asentoon (maan vetovoiman kiihtyvyyden suuntaan) verrattuna.

Taulukko 7. Vinoon ripustamisesta aiheutuva sallittu lisävirhe (vinous 3° , $\cos \varphi = 1$). [2].

	lk 2	lk 1	lk 0,5
$0,05 \times I_b$	3%	2%	1,50%
$I_b \dots I_{\max}$	0,50%	0,40%	0,30%

Mittaria ei pidä asentaa paikkaan, jossa se on alttiina voimakkaalle tärinälle. Pieni tärinä ei vaikuta mittarin tarkkuuteen, mutta voi nopeuttaa sen ikääntymistä. Erittäin voimakas tärinä voi jopa rikkoa mittarin.

3.5 Ulkoisen magneettikentän vaikutus kWh-mittarin tarkkuuteen

Ulkoisen magneettikenttä aiheuttaa muutoksia induktiomittarin virta-, jännite- ja jarrumagneettien magneettivoiden arvoihin. Jarrumagneettiin voi syntyä jopa pysyviä muutoksia, mikäli sen vastustuskyky ei ole riittävä vaikuttavaan kenttään verrattuna. Induktiomittarin teräksinen kotelo suojaa mittarin koneistoa ulkoisen kentän vaikutukselta. Standardeissa määritellään suurimmat sallitut lisävirheet ulkoisen kentän vaikutuksen alaisena:

Taulukko 8. Ulkoisen magneettikentän aiheuttama suurin sallittu lisävirhe kWh-mittarin tarkkuuteen; $I = I_b$, $\cos \varphi = 1$. [2], [3], [4].

	lk 0,2	lk 0,5	lk 1	lk 2
0,5 mT; 50 Hz	0,50%	1%	2%	3%
1000 A/m; 0 Hz	—	—	2%	6%

Magneettikenttien vaikutus staattisiin mittareihin on vähäinen, ainoastaan mittarin mittamuuntajien toiminta voi häiriintyä ulkoisessa magneettikentässä. 0,5 mT magneettivuontiheys on kuitenkin erittäin pieni verrattuna mittamuuntajan normaaliin käyttövuohon. Tällöin ulkoisen kentän vaikutus jää vähäiseksi ja staattisen mittarin kotelo voidaankin valmistaa

muovista aiheuttamatta mainittavaa huononnusta mittarin kykyyn vastustaa ulkoisen kentän vaikutusta.

Mittarien sijoituspaikoilla vaikuttavat magneettikentät ovat pieniä, korkeintaan muutama mikrotlesla. Voimajohtojen lähellä magneettivuon tiheys voi olla noin $15 \mu\text{T}$. Suurempia magneettikenttiä esiintyy esimerkiksi sähköaseman kytkinkentällä ($30 \mu\text{T}$) ja voimalaitoksen kiskostojen lähellä ($50 \mu\text{T}$).

3.6 Ilkivalta

Sähköenergian mittaaminen kohtaa suuria vaikeuksia silloin, kun joku (sähkölaitos, kuluttaja tai joku kolmas osapuoli) tahallaan estää mittauksen oikean suorittamisen. Tavallisesti kyseessä on kuluttajan yritys varastaa sähköenergiaa, taikka kolmannen osapuolen ilkivalta.

Kuluttajan menetelmiä sähköenergiavarkauteen voisivat olla:

- magneetin asettaminen induktiomittarin kylkeen
- ovela kuoren sinetin rikkominen ja laskulaitteen tms. jumiuttaminen
- mittamuuntajaliitännässä muuntajan toisiopiirin katkaiseminen
- ohituskytkennän suorittaminen mittarin tai mittamuuntajan ohi

Sähköenergian varastamistapoja on tutkittu ulkomailla runsaasti ja asiasta löytyy tietoa ulkomaisista julkaisuista. Tässä työssä tähän asiaan ei kuitenkaan puututa tämän lähemmin.

4 Sähkön laatutekijöiden aiheuttamat ongelmat

4.1 Yleistä

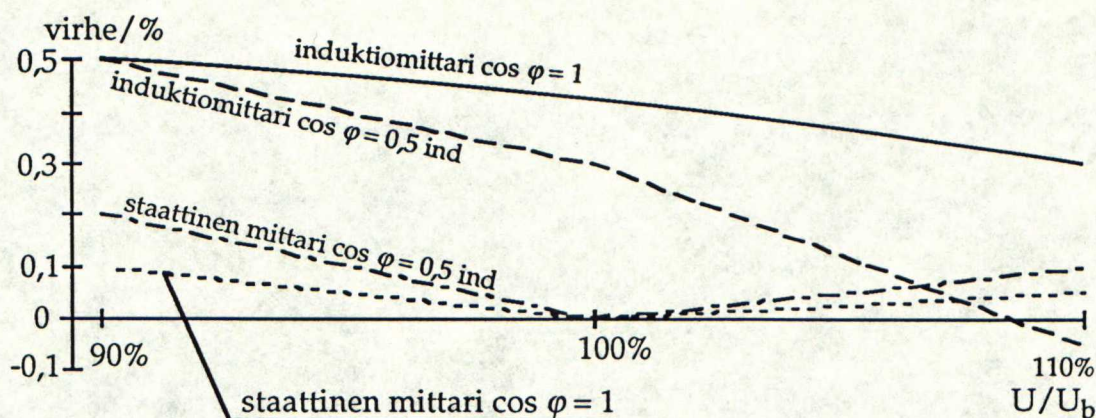
Sähköverkon komponentit on suunniteltu toimimaan olosuhteissa, joissa sähkön laatu on erittäin hyvä. Yhtäältä huono sähkön laatu vaikeuttaa tarkan tuloksen saavuttamista sähköenergian mittaamisessa, toisaalta kuluttaja odottaa saavansa rahojensa vastineeksi hyvälaatuista sähköä. Pyrkimys hyvään sähkön laatuun on kaikkien osapuolien intressi sähköenergian kaupassa, myös tulevaisuuden uusissa sähkökaupan kilpailuolosuhteissa.

Sähköenergian mittaamiseen ongelmia aiheuttavia sähkön laatutekijöitä ovat:

- jännitteen vaihtelu nimellisarvosta
- jännitteen vaihtelun poikkeaminen 50 Hz taajuudesta ts. yliaaltopitoisuus
- jännitteen tasakomponentti
- kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria

4.2 Jännitteen tehollisarvon vaihtelu

Jännitteen tehollisarvon hitaat ja nopeat vaihtelut aiheuttavat jonkin verran virhettä kWh-mittarin näyttämään (kuva 16).



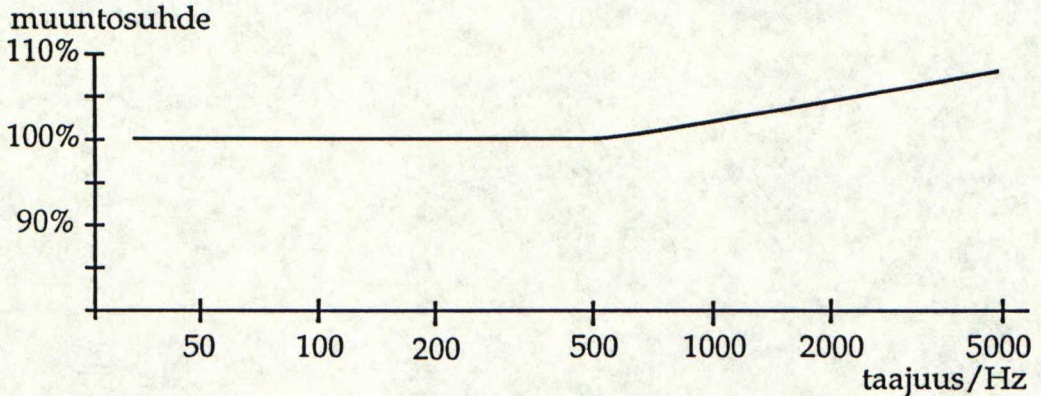
Kuva 16. kWh-mittarin jänniteriippuvuus.

Jännitepiikkien siirtämää energiaa mittarit eivät mittaa kovinkaan tarkasti, mutta niiden sisältämän energian osuus piikin lyhyen keston seurauksena on niin pieni verrattuna kokonaisenergiaan, että piikkien aiheuttama virhe on vaila merkitystä.

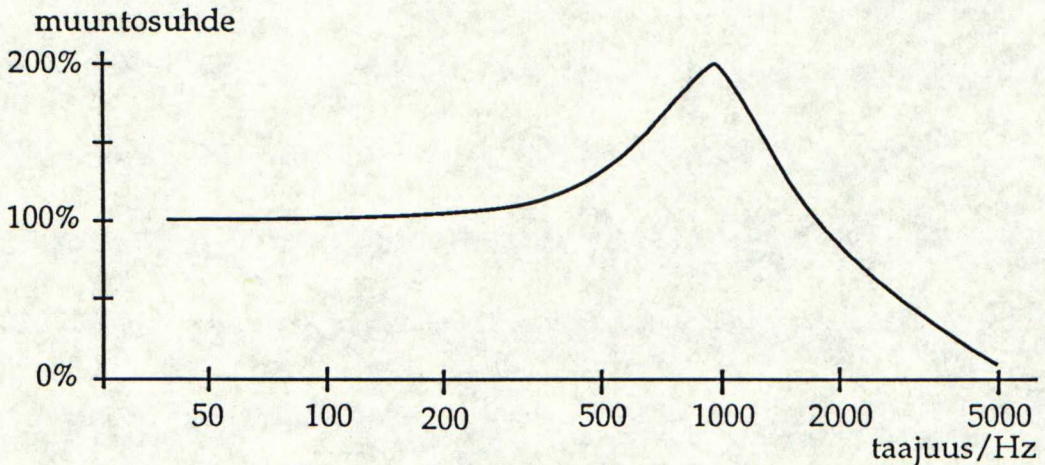
Useimmilla kuluttajilla jännite on hieman suurempi kuin nimellisjännite suuren osan ajasta. Induktioittarin tarkkuus on parhaimmillaan ja staattisen mittarin tarkkuus on hyvä hieman nimellisjännitettä suuremmalla jännitteellä. Energiamittauksen kannalta tämä tilanne on siis edullinen.

4.3 Taajuuden poikkeaminen nimellisarvosta

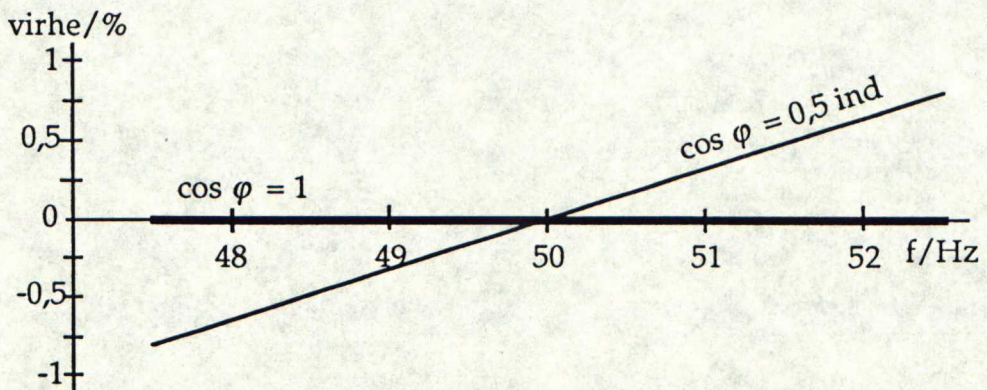
Sekä mittamuuntajien että kWh-mittarin tarkkuus on riippuvainen taajuudesta. Perusaallon taajuuden poiketessa esimerkiksi 2 Hz mittamuuntajien muuntosuhde pysyy miltei vakiona, kuvat (17) ja (18). Taajuuden kasvaessa induktiomittari näyttää hieman liikaa kun tehokerroin on yksi ja hieman liian vähän, kun tehokerroin on 0,5 ind. Staattisen mittarin taajuusriippuvuus on esitetty kuvassa (19):



Kuva 17. Kesijänniteverkossa käytettävään induktiivisen virtamuuntajan muuntosuhteen taajuusriippuvuus. [13].



Kuva 18. Kesijänniteverkossa käytettävään induktiivisen jännitemuuntajan muuntosuhteen taajuusriippuvuus. [13].



Kuva 19. Staattisen kWh-mittarin taajuusriippuvuus (47,5...52,5 Hz; lk 2) [5].

Standardit sallivat pienten taajuuden muutosten aiheuttama lisävirhettä taulukon (9) mukaisesti:

Taulukko 9. Taajuuden vaihtelun aiheuttama suurin sallittu lisävirhe kWh-mittarin näyttämään (47,5...52,5 Hz) [2], [3], [4].

cos φ	lk 2	lk 1	lk 0,5 s	lk 0,2 s
1	1%	0,7%	0,2%	0,1%
0,5	1,5%	1%	0,2%	0,1%

Taajuuden keskiarvo pitkällä aikavälillä on 50 Hz. Siten pienistä, hetkellisistä taajuuden muutoksista aiheutuvat virheet energiamittaukseen kumoutuvat ajan kuluessa ja ovat siten vailla merkitystä energiamittauksen kannalta.

4.4 Yliaaltojen vaikutus sähköenergian mittaamiseen

4.4.1 Yleistä

Jännitteen tai virran käyrämuodon poiketessa sinimuotoisesta, perustaajuisesta muodosta sen sanotaan olevan säröytynyt. Fourier-analyysin mukaan jännitteessä on tällöin perustaajuisen komponentin lisäksi harmonisia yliaaltoja, joiden taajuudet ovat perustaajuuden monikertoja. Suurimpia sähkönjakeluverkossa esiintyviä yliaaltoja ovat kolmas, viides ja seitsemäs harmoninen (150, 250 ja 350 Hz) [14]. Epäharmoniset ja muut harmoniset yliaallot ovat pieniä näihin verrattuna.

Yliaaltoja syntyy pääasiassa tehon säädön seurauksena, esim. suuntaajalaitteita käytettäessä. Myös sähkökoneiden magneettipiirien kyllästymisen sekä pyöri-
vissä sähkökoneissa että muuntajissa synnyttää yliaaltoja. Yliaallot aiheuttavat monenlaisia haittoja sähköverkolle ja sähköverkossa oleville laitteille. Sähkökoneiden, loistehon kompensointilaitteiden ja sähköverkon häviöt kasvavat ja eristeiden ikääntyminen nopeutuu.

Yliaaltojen lähde on sähköverkon kannalta epälineaarinen kuorma ja virtalähde. Verkossa kulkevat yliaaltovirrat aiheuttavat verkon sarjaimpedansseissa Ohmin lain mukaan jännitehäviön, jonka seurauksena verkon jännite säröytyy.

Kulutettu energia on eritaajuisten energiakomponenttien aritmeettinen summa. Jotkut sähkölaitteet kykenevät hyödyntämään yliaaltojen sisältämän energian yhtälailla, mutta toisissa (esim. moottorit) yliaallot aiheuttavat ainoastaan lisähäviöitä. Yliaallot siirtävät energiaa vähän verrattuna perusaaltoon. Jos jännitteen särö on 5%, on yliaaltoteho lineaarisella kuormalla (oletetaan, että $\cos \varphi = 1$):

$$P_d = \frac{U_d^2}{R} = (0,05)^2 \times \frac{U^2}{R} = 2,5\% P \quad (12)$$

missä:

P_d yliaaltoteho
 P kokonaisteho
 R lineaarisen kuorman resistanssi

U_d yliaaltojännite
 U kokonaisjännite

Epälineaarisen kuorman tapauksessa on usein varsin suuria virran yliaaltoja. Verkossa muodostuu tällöin, kuten edellä on todettu, jännitteen särökomponentteja. Kokonaisteho on tällöin eri taajuuksien tehokomponenttien summa, jossa yksittäinen termi on tietyn taajuuden jännitteen, virran ja näiden välisen vaihekulman kosinin tulo.

Jännitteen yliaallot ovat käytännössä varsin pieniä, alle 5%. Näin ollen energia, joka siirtyy jännitteen yliaaltojen siirtämänä suuremmalla taajuudella kuin 50 Hz, on pieni. Siirtyvä energia on huomattavasti suurempi sellaisessa tapauksessa, jossa jännitteen yliaaltojen lisäksi virrassa on suuria yliaaltokomponentteja.

4.4.2 Yliaaltojen vaikutus induktiomittariin lineaarisella kuormalla

Induktiomittarin rautasydämen magnetoitumiskäyrän epälineaaristen ominaisuuksien ja ankkurilevyn impedanssin taajuusriippuvuuden seurauksena induktiomittarin näyttämä pienenee voimakkaasti taajuuden kasvaessa [14]:

Arvioitaessa induktiomittarin virhettä silloin, kun osa energiasta siirtyy yliharmonisina komponentteina, voidaan käyttää superpositioperiaatetta eli laskea yhteen eritaajuuksien komponenttien energiat kerrottuna ko. energiakomponentti mittarin vasteen mukaisella kertoimella:

$$W = \sum_i k_i W_i \quad (13)$$

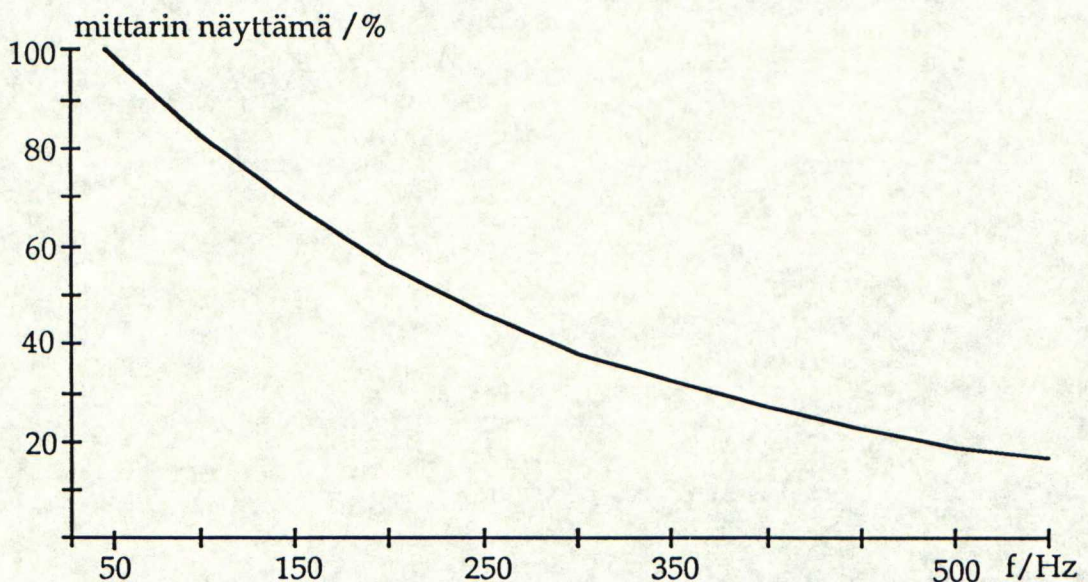
missä:

W mittarin näyttämä

k_i eri taajuuksien energiakomponenttien kertoimet (kuvasta 20)

W_i eri taajuiset energiakomponentit

Arvio on varsin tarkka; pientä virhettä aiheutuu siitä, että eri taajuiset komponentit aiheuttavat ankkurilevyyden pienen transientin lisävääntömomentin.



Kuva 20. Induktiomittarin taajuusriippuvuus. Näyttämä $\approx 0\%$, kun $f \approx 6 \text{ kHz}$. [14], [15].

Kun yliaaltoteho siirtyy samaan suuntaan kuin perustaajuinen teho, mittarin virhe on hieman pienempi (itseisarvoltaan) kuin yhtälön (13) mukaan laskettu virhe ja kun yliaaltotehon suunta on eri kuin perustaajuisen tehon, virhe on hiukan suurempi. Eron suuruus on noin 10% yhtälön (13) mukaan lasketusta virheestä; esimerkiksi, jos yhtälö (13) avulla mittarin virheeksi saadaan -5%, todellinen virhe on -4,5%. Ero johtuu edellä mainituista eri taajuuksien virtojen ja jännitteiden yhdessä aiheuttamista lisävääntömomenteista [14].

Taulukko 10. Induktioimittarin virhe, kun energia koostuu eritaajuisista komponenteista yhtälön (13) mukaan laskettuna. W_{tot} = todellinen energia, W = mittarin näyttämä energia.

no.	50 Hz	150 Hz	250 Hz	350 Hz	W_{tot}	W	virhe
1	100	0	0	0	100	100	0%
2	90	10	0	0	100	96,9	-3%
3	90	0	10	0	100	94,6	-5%
4	90	0	0	10	100	93,2	-7%
5	85	10	5	0	100	94,2	-6%
6	85	0	10	5	100	91,2	-9%
7	80	10	5	5	100	90,8	-9%
8	110	-10	0	0	100	103,1	3%

Säröytyneen jännitteen aiheuttama yliaaltoenergia tulee kuluttajalle edulliseksi, mikäli kuluttaja sen kykenee käyttämään hyväkseen. Silloin kun kuluttaja palauttaa osan ostamastaan perustaajuisesta energiasta yliaaltoenergiana, on induktioimittarin virhe positiivinen (tapaus 8). Tällöin kuluttaja maksaa liikaa ostamastaan kokonaisenergiasta. Tapaus ei ole edullinen energian myyjällekään, onhan mittarin näyttämä pienempi kuin myyjän tuotteen – perustaajuksen sähköenergian – menekki. Palautettu yliaaltoenergia ei ole myyjän kannalta toivottua myöskään sähkönsäädön huononemisen takia.

4.4.3 Yliaaltojen vaikutus induktioimittariin epälineaarilla kuormalla

Jäykässä verkossa epälineaarinen kuorma ei aiheuttaisi lainkaan energian siirtymistä yliharmonisilla taajuuksilla. Siitä huolimatta induktioimittarin näyttämä olisi hieman virheellinen johtuen mittarin keskinäisinduktansseista ja magneettivuon vaihesiirron virheestä [15]. Pieni lisävääntömomentti syntyy myös jännitejärjestelmän epälineaaristen ominaisuuksien seurauksena. Jännitejärjestelmän vuohon syntyy yliharmonisia komponentteja ja ne yhdessä kuormavirran samantaajuuksien komponenttien kanssa synnyttävät po. vääntömomentin. Virheet ovat kuitenkin varsin pieniä, alle 1% ja useimmiten positiivisia [14].

On osoittautunut, että induktio-kWh-mittarin virhe on pienempi kuin sallittu virhe ko. luokassa, kun epäyhtälö (14) saa pienemmän arvon kuin kutakin virherajaa vastaava vakio k [16]:

$$D_i \sqrt{I/I_b} < k \quad (14)$$

jossa D_i = virran särö, I = virta ja I_b = mittarin nimellisvirta, $k = 0,3$ vastaa 2% virhettä ja $k = 0,17$ vastaa 1% virhettä.

Kun kuormavirta on nimellisvirran suuruinen, saa virran särö olla 30%, kun suurin sallittu virhe on 2%. Mittaristandardeissa sallitaan virran särön aiheuttaa virhettä kWh-mittarin toimintaan taulukon (11) mukaisesti:

Taulukko 11. Virran särön aiheuttama suurin sallittu lisävirhe kWh-mittarin näytännään. $I = I_b$ (S-luokissa $I = 0,5 I_b$), $\cos \varphi = 1$, yliaallon taajuus 150 Hz. [2], [3], [4].

lk2	lk 1	lk 0,5	lk 0,5 S	lk 0,2 S
0,8%	0,6%	0,5%	0,1%	0,1%

Käytännön sähköjakeluverkossa esiintyy aina jonkin verran säröä. Tällöin epälineaarisen kuorman vaikutuksesta siirtyy energiaa niillä taajuuksilla, joilla esiintyy sekä sen taajuinen virta että jännite.

kWh-mittarin mittaama sähköenergia muodostuu monien erilaisten kuormitusten summana. Yliaaltoja aiheuttavien laitteiden kuormavirta sekoittuu muihin virtoihin. Tästä syystä mittarin havaitseman särötehon esiintyminen vaihtelee hyvin paljon sekä mittarikohtaisesti että ajallisesti.

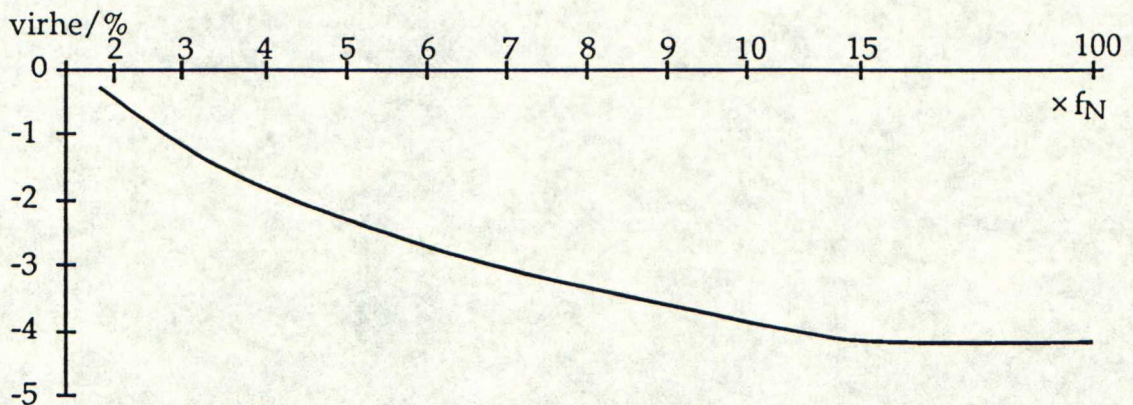
Arvioitaessa yliaaltojen aiheuttamaa virhettä sähköenergian mittaamiseen, on tunnettava tarkasti kaikki särötehon (ja -energian) siirtymiseen vaikuttavat sähkösuureet:

- perusaallon jännite, virta ja vaihekulmat
- kunkin yliaaltokomponentin jännite, virta ja vaihekulmat
(tärkeimmät taajuudet ovat 150 Hz, 250 Hz ja 350 Hz)

Mittarin näyttämää voidaan näiden olosuhteiden vallitessa arvioida laskemalla kullakin taajuudella siirtynyt energia ja laskemalla edelleen mittarin teoreettinen näyttämä yhtälön (13) ja kuvan (20) avulla. Yliaaltojen siirtämä energia voidaan myös mitata TKK:n Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratoriossa valmisteilla olevalla sähköanalysaattorilla kunhan laite valmistuu.

Esimerkki:

f-taajuinen yliaalto esiintyy sekä jännitteessä että virrassa. Yliaaltojännitteen suuruus on 0,05 p.u ja virran 0,1 p.u, vaihekulmat ovat 0° . Perustaajuinen jännite on 1 p.u ja virta 0,1 p.u ja tehokerroin 1. Esitetään induktiomittarin virhe taajuuden funktiona (mittaustulokset lähteessä [14] ovat yhtenevät teoreettisen arvion kanssa):



Kuva 21. Induktioimittarin virhe superponoituneen harmonisen komponentin taajuuden funktiona.

4.4.4 Yliaaltojen vaikutus staattiseen mittariin

Staattiset mittarit eivät ole niin alttiita mittaamaan virheellisesti yliaaltojen vaikutuksesta kuin induktiomittarit. Staattisten mittarien toiminta perustuu hetkellisarvojen perusteella laskettujen hetkellisten tehojen integrointiin, jolloin mittausta tapahtuu hyvällä tarkkuudella. Niissä kuormituksissa, joissa virran ja/tai jännitteen epäillään olevan niin säröytynyt, että se voi vaikuttaa energian mittaamisen tarkkuuteen, ja ennemmin on käytetty induktiomittaria, on syytä harkita mittarin vaihtamista staattiseen.

Hetkellisarvojen integrointiin perustuvien staattisten mittarien virhe erilaisten yliaaltoja sisältävien kuormitusten mittaamisessa on pieni, taulukko (12):

Taulukko 12. Staattisen mittarin virhe erilaisilla yliaaltoja sisältävillä kuormituksilla, perusaallon tehokerroin =1 [17].

	Jännite	Virta	Virhe
1	perusaalto	$I_b + 10\% \text{ 150 Hz}$	-0,14%
2	perusaalto	puoliaaltotasasuunnattu $I_{\max}/2$	0,88%
3	perusaalto	90° ja 270° kulmassa ohjattu I_{\max}	0,46%
4	perusaalto + 3% 150 Hz + 6% 250 Hz + 5% 350 Hz + 1,5% 450 Hz + 3,5% 550 Hz + 3% 650 Hz +	I_b + kaikki jännitteeseen verrannolliset yliaallot (lineaarinen kuorma)	0,10%
5	perusaalto	1 kpl perusaallon jaksoja $I=I_{\max}$ erotettuna y kpl jakson aikoja $I=0$ $y=1,3$ tai 5 (pulse-burst -modulation)	0,27%

Mikäli mittaus perustuisi tehollisarvojen laskentaan, muodostuisi mittarin lukemaan virhe esimerkiksi silloin, kun yliaaltoja esiintyy pelkästään virrassa. Virheen suuruus olisi tällöin:

$$\frac{W - W_{\text{tot}}}{W_{\text{tot}}} = \frac{I_{\text{rms}} - I}{I} \quad (15)$$

jossa W = mittarin näyttämä, W_{tot} = todellinen energia, I_{rms} = virran tehollisarvo ja I perusaallon tehollisarvo.

Virhe olisi vieläkin suurempi, mikäli yliaaltovirtojen vaihekulmat perusaaltovirtaan olisivat sellaiset, että virran nollakohta osuisi eri kohtaan kuin perusaaltovirran nollakohta. Tällöin tekijä $\cos \varphi$:n arvo muuttuisi.

4.5 Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetriset tilat

Symmetrisessä kolmivaiheisessa järjestelmässä kaikkien kolmen vaiheen jännite on saman suuruinen ja vaihtelee symmetrisesti positiivisen ja itseisarvoltaan samansuuruisen negatiivisen huippuarvon välillä nimellistaajuuden määräämässä tahdissa. Vaihejännitteiden tulisi siis olla identtiset lukuunottamatta nii-

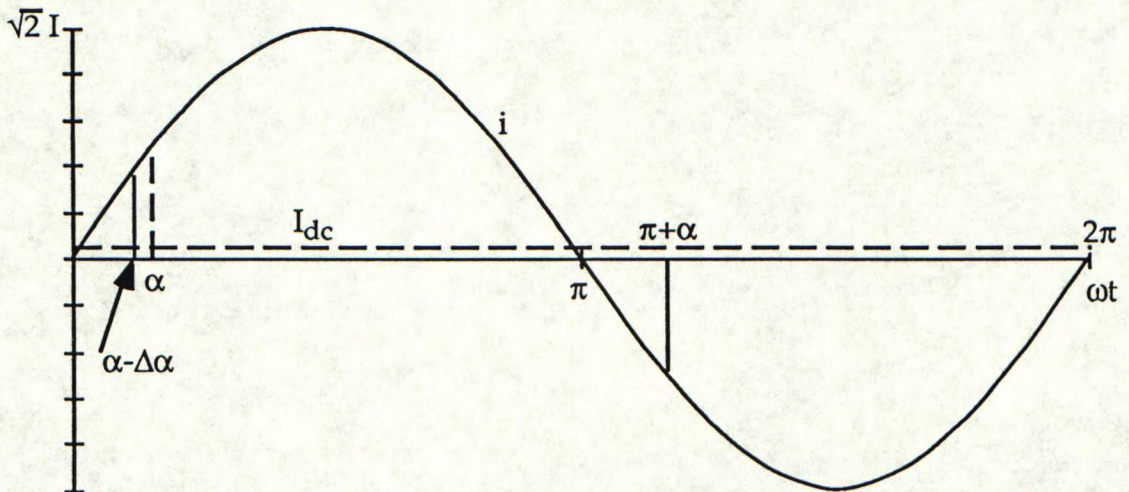
den välistä 120° vaihesiirtoa.

Käytännössä jännitteet eivät ole täysin symmetriset. Kuormitukset eivät jakaannu sähkönjakeluverkossa tasan kaikille vaiheille, jolloin niissä tapahtuu erilainen jännitehäviö. Myös verkon impedansseissa on vaihekohtaisia eroja.

4.5.1 Jännitteen tasakomponentti

Eräät kuormitustyytit eivät kuormita jännitteen positiivista ja negatiivista puolijaksoa samalla tavalla ts. niiden kuormavirrassa on tasakomponentti. Tämä aiheuttaa vastaavan tasakomponentin myös jännitteeseen.

Jännitteen tasakomponentin synnyttävät tasavirtojen aiheuttamat jännitehäviöt verkon sarjaimpedansseissa. Tasavirtaa ottavia laitteita ovat erilaiset suuntaajat. Kokoaaltotasasuuntauksessakin muodostuu pieni tasavirta vaihtosähköverkkoon, koska tasasuuntaussillan puolijohdekomponenttien syttymiskulma on erilainen positiivisella ja negatiivisella puolijaksolla [18].



Kuva 22. Tasakomponentin syntyminen kokoaaltotasasuuntaajan kuormitusvirtaan. Tyristori syttyy positiivisella puolijaksolla kulmassa $\alpha - \Delta\alpha$ ja negatiivisella kulmassa $\pi + \alpha$.

Jännitteen tasakomponentti ei siirry jännitemuuntajan ensiöjännitteestä toisiojännitteeseen. Suuri tasakomponentti kuitenkin kyllästää muuntajan rautasydämen ja aiheuttaa siten virheen muuntajan toimintaan.

Jännitemuuntaja sietää kuitenkin varsin suuren tasakomponentin, ilman että siitä aiheutuisi virhettä. 0,1 p.u. tasakomponentti ei aiheuta sanottavaa muutosta jännitemuuntajan muuntosuhteeseen eikä ensiö- ja toisiojännitteen vaiheeroon [19].

Induktiomittarissa tasakomponentti ei aiheuta vääntömomenttia ankkurilevyyn ts. mittari ei mittaa tasakomponentin siirtämää energiaa. Kuluttajan ottama tai tuottama tasasähköenergia W_{dc} aiheuttaa mittarin näyttämään siten energioiden suhteeseen verrannollisen virheen ΔE [15]:

$$\Delta W = -\frac{W_{dc}}{W_{tot}} \quad (16)$$

Virheen etumerkki on siis positiivinen, kun tasasähköenergia on virrannut eri suuntaan kuin kokonaisenergia W_{tot} .

Staattiset mittarit, joissa on magneettiset mittamuuntajat, eivät kykene mittaamaan tasasähköenergiaa, koska tasakomponentti ei toistu mittamuuntajien toisiopuolella.

4.5.2 Jännite-epäsymmetria

Jännite-epäsymmetrian aiheuttaa kuormien epätasainen jakaantuminen vaiheiden kesken. Suuria yksittäisiä paikallisen epäsymmetrian aiheuttajia 110 kV verkossa ovat sähköjunat. Pienjänniteverkossa epäsymmetria voi olla suurikin. Epäsymmetria voi esiintyä jännitteiden itseisarvojen, vaihekulmien tai molempien epäsymmetriana.

Suuret erot vaihejännitteiden tehollisarvoissa aiheuttavat virhettä kWh-mittarin toimintaan mittarin jänniteriippuvuuden mukaisesti (kuva 18). Muutaman prosentin, joka sinänsä olisi jo suuri epäsymmetria, erot eivät aiheuta mainittavaa virhettä.

Mikäli epäsymmetria esiintyisi jännitteen suuruuden sijasta vaihe-eron poikkeamana 120 asteesta (ns. kulmaepäsymmetria), muodostuisi induktiomittariin vaihejärjestysvirhe (luku 2.3.2). Myös jännite-epäsymmetria voi vaikuttaa vaihejärjestysvirheen esiintymiseen.

5 Mittaustavasta johtuvat ongelmat sähköenergian mittaamiseen

5.1 Yleistä

Sähköenergian mittaamiseen voi syntyä virhettä mittaustavan tai -laitteiden virheellisten valintojen seurauksena. Myös mahdolliset tarkoituksetta syntyneet muutokset mittauskytkennässä tai mittalaitteissa voivat aiheuttaa ongelmia sähköenergian mittaamiseen.

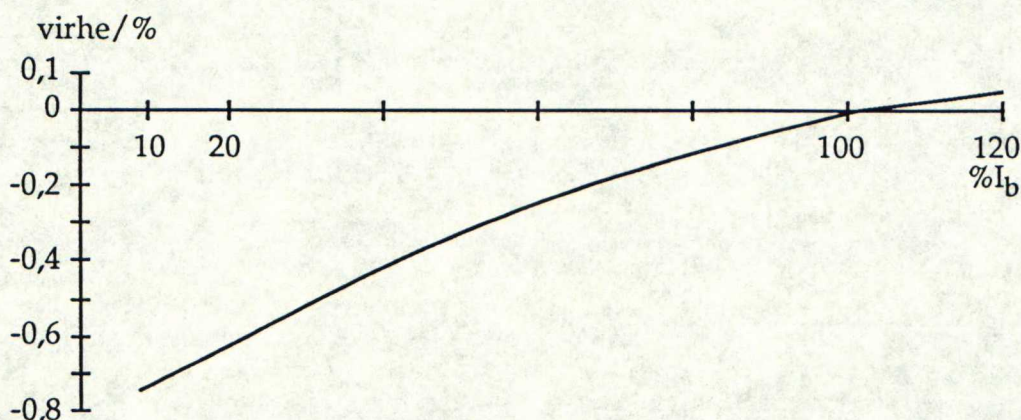
5.2 Virheellinen mittamuuntajan valinta

5.2.1 Virheellinen virtamuuntajan muuntosuhteen valinta

Mitattaessa sähköenergiaa mittamuuntajien välityksellä voi mittaustuloksen tulkinta olla virheellinen, mikäli mittarin primäärilaskulaitteen viritys menee vikaan, tai sekundaarilaskulaitteen tulosta tulkitaan väärin. Tällä tavoin syntynyt virhe on onneksi helppo korjata.

Mittamuuntajan muuntosuhteen valinnassa on otettava huomioon, että toisiovirran on oltava mittamuuntajan toisiopiiriin kytkettäville mittareille sopiva. Tavallisesti toisiovirran nimellisarvo on 5 A, mutta joissakin tapauksissa on syytä valita pienempi toisiovirta, esimerkiksi silloin kun mittari on sijoitettava kauas virtamuuntajasta.

Toiseksi, ensiövirran nimellisarvon on oltava oikeassa suhteessa mitattavassa kohteessa kulkeviin virtoihin. Nimellisvirran on oltava niin suuri, että virtamuuntaja ei ylikuormitu ja säilyttää tarkkuutensa suurienkin kuormitusten aikana. Virtamuuntajastandardin mukaan virtamuuntajan tarkkuusluokka on määritelty, kun virta ylittää nimellisvirran enintään 20%.



Kuva 23. Virtamuuntajan muuntosuhdevirhe virran funktiona nimellistaakalla.

Ensiövirran nimellisarvoa ei tule valita liian suureksikaan. Jos se on tarpeettoman suuri, mittarin pienintä käyntiinlähtökuormaa vastaava kuormitus kasvaa. Pienillä virroilla sekä mittarien että virtamuuntajien tarkkuus on huonoimmillaan (kuvat 7, 11 ja 23), joskin virheiden suunta on erilainen, jolloin suuresta nimellisensiövirrasta ei aiheudu kovinkaan suurta virhettä energian mittaukseen.

muutoin kuin käyntiinlähtökuorman osalta.

Toinen suuresta nimellisensiövirrasta aiheutuva ongelma on virtamuuntajan rautasydämessä esiintyvän jäännösmagnetismin eli remanenssin poistumisen hidastuminen. Remanenssi poistuu vaihtomagnetoinnin ansiosta sitä nopeammin, mitä suurempi virta (suhteessa nimellisvirtaan) sydäntä magnetoi.

5.2.2 Virheellinen virtamuuntajan taakka

Mittamuuntajien taakan on oltava 25...100% nimellistaakasta, jotta muuntajan tarkkuusluokka olisi mittamuuntajastandardien mukainen. Käytettäessä nykyisin yhä yleisempiä rengasvirtamuuntajia on huomioitava niiden varsin pienet kuormitettavuudet.

Mittamuuntajien virhe on riippuvainen todellisesta toisiotaakasta, joka lasketaan toisiojohtimien ja eri laitteiden kuormitusten summana. Virtamuuntajan taakka nimellisvirralla saadaan likimäärin yhtälöstä (17):

$$S_2 = S_L + \left(\frac{\rho \times l}{A}\right) \times I^2 \quad (17)$$

missä:

S_2 = toisiotaakka

S_L = mittarin taakka

ρ = johtimen resistiivisyys (kuparille $1,72 \times 10^{-8} \Omega m$)

l = meno- ja paluujohtimien yhteispituus

A = johtimen pinta-ala

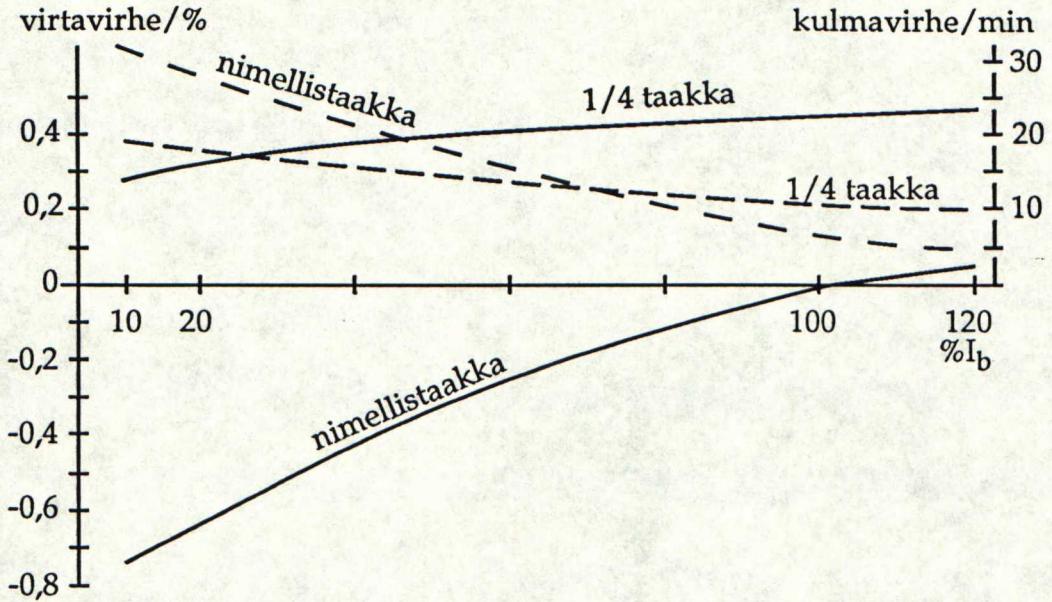
I = toision nimellisvirta

Mikäli sekä mittarin että virtamuuntajaryhmän luona on muodostettu kolmivaihejärjestelmän tähtipiste, ei tähtipisteiden välisissä johdoissa kulje virtaa. Tällöin paluujohtimien mittaa ei oteta huomioon taakkaa laskettaessa. Vaihtoehtoisilla kytkennöillä voidaan säätää virtamuuntajan taakkaa sille sopivaksi.

Virtamuuntajassa toisiovirta pienenee taakan kasvaessa, koska tällöin yhä suurempi osa virrasta menee sydämen magnetointiin (poikittaishaara kuvassa 12) virranjaon muuttuessa. Pienellä taakalla virtamuuntajan toisiovirta on liian suuri ja suurella taakalla liian pieni koko virta-alueella. Paras tarkkuus saadaan kun taakka on n. 75% nimellistaakasta [10].

Toisiovirran vaihekulma on positiivinen (eli edellä ensiövirtaa) ja pienenee virran kasvaessa vakiotaakalla. Pienillä virroilla kulmavirhe suurenee taakan kasvaessa. Suurilla virroilla taakan vaikutus on päinvastainen: kulmavirhe pienenee taakan kasvaessa.

Resistiivisellä taakalla kulmavirhe on suuri ja virtavirhe pieni ja induktiivisella taakalla päinvastoin.



Kuva 24. Virtamuuntajan virta- ja kulmavirhe eri taakoilla virran funktiona. Virtavirhe yhtenäisillä viivoilla, kulmavirhe katkoviivoilla. [5].

Mittaustarkoitukseen käytettävän virtamuuntajan toisiovirta ei saa kasvaa kovin suureksi verkon vikatilanteissakaan. Virran rajoitus perustuu rautasydämen kyllästymiseen suurilla ensiövirroilla, niin että toisiovirran kasvu hidastuu tiettyä ensiövirran arvoa suuremmilla virroilla. Kyllästymisen vaikutuksesta mittausvirtamuuntajan virhe on 10% virralla I , kun:

$$I = F_s \times I_b \quad (18)$$

missä F_s on mittarivarmuuskerroin.

Mittarivarmuuskertoimen arvo ilmoitetaan nimellistaakalla. Kun taakka poikkeaa nimellistaakasta, saadaan todellinen mittarivarmuuskerroin yhtälöstä (19):

$$F_s = F_{sb} \left| \frac{S_i + S_b}{S_i + S_2} \right| \quad (19)$$

missä F_{sb} on mittarivarmuuskerroin nimellistaakalla, $S_i = Z_{s2} I_{2b}^2$ sisätaakka, S_b nimellistaakka ja S_2 todellinen taakka.

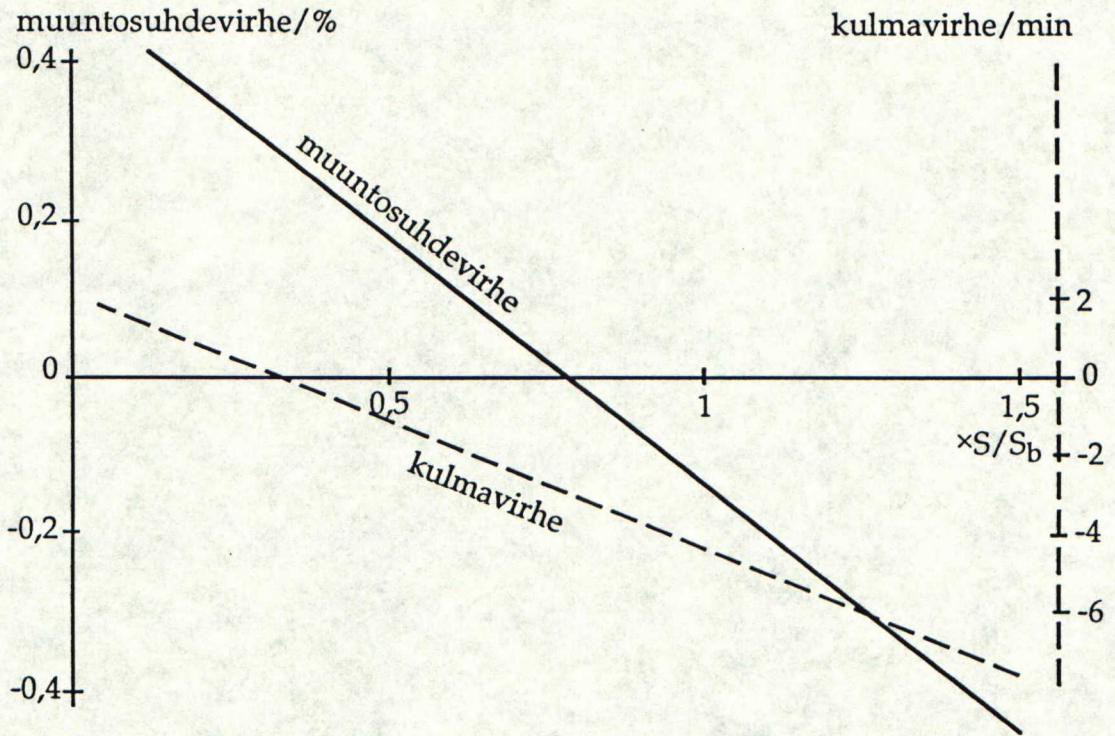
Mittarivarmuuskertoimen tulisi olla pienempi kuin 10. Käytännössä mittarivarmuuskerroin on usein kuitenkin suurempi kuin 10 (kun $F_{sb} = 10$), koska todelliset toisiotaakat ovat nimellistaakkoja pienempiä.

5.2.3 Virheellinen jännitemuuntajan taakka

Jännitemuuntajan toisiojännite pienenee taakan kasvaessa. Jännitemuuntajat suunnitellaan siten, että sekä muuntosuhde että kulmavirhe ovat pienellä taakalla positiivisia ja suurella taakalla negatiivisia. Taakan vaihekulman kasvaessa kulmavirhe muuttuu negatiiviseen suuntaan. Tarkkuus on parhaimmillaan, kun taakka on jonkin verran nimellistaakkaa pienempi, kuva (25).

Jännitemuuntajien virheellisen taakan aiheuttama virhe muuntosuhteeseen on käytännössä suurin ongelma sähköenergian mittaamisessa. Jännitemuuntajien taakat saattavat olla toisinaan hyvinkin pieniä. Erityisen paha tilanne on vanhoilla kantaverkon sähköasemilla, joissa on vanhat, hyvin tehokkaat muuntajat ja staattiset tarkkuusmittarit, joiden taakka on hyvin pieni. Monissa tapauksissa suojarleet kuormittavat samoja jännitemuuntajia ja muodostavat näin lisää taakkaa. Keski-jännitejako-verkon kuluttajamittauksissa releiden kuormitusta ei esiinny, jolloin taakka on hyvin pieni, mikäli käytetään staattista mittaria, johon on erillinen apujännitteen syöttö.

Mikäli jännitemuuntajan taakka on liian pieni ($<0,25 \times S_b$), voidaan sitä lisätä erityisellä kuormitusvastuksella. Vastus kytketään mittarin rinnalle. Oikea sijoi-tuspaikka on muuntajan luona, tällöin johtimissa ei tapahdu ylimääräistä jänni-tehäviötä.



Kuva 25. Jännitemuuntajan muuntosuhde- ja kulmavirhe taakan funktiona nimellis-jännitteellä. [5].

5.3 Jännitehäviö jännitemuuntajan toisiopiirissä

Jännitemuuntajastandardin mukaan jännitemuuntajan toisiopiirissä saa tapahtua enintään taulukon (1) mukainen jännitehäviö piirin johtimissa, oikosulkusuo-jassa ja kosketusresistansseissa ts. muualla kuin itse kWh-mittarissa. Suurin sallittu jännitehäviö määräytyy käytettävän mittarin tarkkuuden mukaan vuosittaisen energiankulutuksen perusteella ja se vaihtelee 0,1...0,5% välillä.

Standardissa määrätään käyttämään vähintään 2,5 mm² johtimia. Mikäli jänni-tehäviö muodostuu tällöin liian suureksi, on valittava paksummat johtimet. Jos kWh-mittarin kytkentä on suoritettu kuvan (4) mukaisesti, jolloin sekä mittaris-sa että muuntajaryhmän luona on kolmivaihejärjestelmän tähtipiste, tapahtuu kunkin vaiheen jännitehäviö vain muuntajan ja mittarin välisessä johtimessa. Muuntajaryhmän ja mittarin tähtipisteiden välisessä johdossa ei kulje virtaa,

jolloin siinä ei tapahdu jännitehäviötä. Jännitehäviöiden minimoimiseksi kytkentä on syytä suorittaa juuri tällä tavalla.

Toisiopiirin suhteellinen jännitehäviö U_h saadaan likimääräisesti yhtälöstä (20):

$$U_h = \frac{S}{U_2^2} \left(\frac{l \times \rho}{A} + R \right) \times 100\% \quad (20)$$

U_2	muuntajan toisiojännite	S	mittarin taakka
A	johtimen poikkipinta-ala	l	johtimen pituus
R	lisäresistanssi, aiheutuu kosketusresistansseista ja oikosulkusuojusta (n. 0,1 Ω)	ρ	kuparin resistiivisyys ($1,72 \times 10^{-8} \Omega m$)

Toisiopiirissä on käytettävä oikosulkusuojaa, esimerkiksi sulakesuojausta. Mikäli oikosulkusuojana käytetään johdonsuojakatkaisijaa, on otettava huomioon sen sisäinen resistanssi, joka pienivirtaisissa johdonsuojakatkaisijoissa voi olla suurikin (jopa 35 Ω). Käytännössä oikosulkusuojana käytetään 10 A nimellisvirtaista johdonsuojakatkaisijaa, jonka sisäinen resistanssi on vain noin 10...15 m Ω .

5.4 Lisälaitteiden aiheuttama magneettikenttä

Kaksi- (tai useampi-) aikaista tariffia käytettäessä kWh-mittarin lisäksi tarvitaan koje, joka ohjaa mittarin mitattaman energian oikealle laskulaitteelle. Kojena on joko staattinen tai mekaaninen kello tai kauko-ohjausjärjestelmän (esimerkiksi verkkokäskyohjauksen) päätelaite.

Kojeilla on omakulutus, joka on otettava huomioon silloin, kun koje kuormittaa mittamuuntajan toisiopiiriä.

Mikäli koje on sähkömekaaninen laite, aiheuttaa se ympärilleen magneettikentän, jolla on vaikutus kWh-mittarin toimintaan (ks. luku 3.4). Standardeissa sallitut suurimmat lisälaitteiden synnyttämien magneettikenttien aiheuttamat lisävirheet ovat taulukossa (13):

*Taulukko 13. Lisälaitteiden synnyttämien magneettikenttien aiheuttamat suurimmat sallitut lisävirheet. *) Standardissa IEC 687 tarkkuusluokka 0,5 S. [2], [3], [4].*

Standardi	I/I_n	$\cos \varphi$	lk 0,2s	lk 0,5(s)	lk 1	lk 2
IEC 521	0,05	1	–	0,3%	0,5%	1%
IEC 687 *)	0,01	1	0,05%	0,1%	–	–
IEC 1036	0,05	1	–	–	0,5%	1%

Suurimmat sallitut lisävirheet ovat pienempiä kuin muista magneettikentistä sallittavat virheet.

Tariffilaitteiden aiheuttamat magneettikentät ovat niin pieniä, ettei niillä ole mainittavaa vaikutusta sähköenergian mittaamiseen tarkkuuteen.

5.5 Mittarin ikääntyminen

Induktiomittarin toiminta ei pysy samanlaisena läpi sen kymmeniä vuosia kestävä eliniän. Ajan myötä mittarin laakereissa ja jarrumagneetissa voi tapahtua muutoksia. Sen sijaan mittamuuntajien ja staattisten mittarien ominaisuudet eivät periaatteessa muutu niiden ikääntyessä.

Induktiomittarin ikääntymistä nopeuttavia tekijöitä ovat luvussa 3 esitetyt ympäristöolosuhteet (pöly, syövyttävät kaasut yms.) ja mittarin mittaushistoriaan liittyvät tapahtumat; lähinnä mittarin läpi kulkeneet oikosulkuvirrat.

Ajan myötä induktiomittarin laakereihin kertyy pölyä ja laakerien öljy vanhenee. Tämän seurauksena laakerien kitka suurenee ja mittarin virhe pienillä kuormilla ($I < 0,3 \times I_b$) suurenee. Virhe voi olla jopa -5% kun $I \approx 0,1 \times I_b$.

Mikäli jarrumagneetin koersitiivivoima on suurten virtojen tai ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta heikentynyt, nopeutuu mittari erityisesti suurilla kuormituksilla. Tavallisesti mittarit nopeutuvat vanhetessaan kuitenkin vain joitakin promilleja. Suuruusluokka, jonka ylittävät virrat voivat aiheuttaa muutoksia mittarin ominaisuuksiin, on noin $200 \times I_{\max}$ ($I_{\max} = 2 \dots 4 \times I_b$, tutkituilla mittareilla 40A) [20].

Mittamuuntajien ominaisuuksien ei ole juurikaan havaittu muuttuvan niiden vanhetessa, rikkoontumisia sattuu jonkin verran. Keski-Euroopassa saadun kokemuksen perusteella mittamuuntajien toiminnan tarkastamista ei ole katsottu niin tärkeäksi kuin kWh-mittarien tarkastaminen on.

5.5.1 Määräaikaishuollot

Ikääntymisen vaikutuksien eliminoimiseksi induktiomittari on syytä huoltaa sopivin aikavälein. Sähkölaitosyhdistys on antanut suosituksen sopivista induktiomittarin ja muiden sähköenergian mittaamiseen tarvittavien ja huoltoa kaipaavien laitteiden määräaikaishuoltoväleistä (taulukko 14).

Taulukko 14. Suositeltavia määräaikaishuoltovälejä vuosina [21].

Laitetyyppi	Suosittelava huoltoväli
Lk 2 induktiomittari, 2-kivilaakeri ja kuiva laskulaite, tunnettu valmistaja *	18...20
Lk 2 induktiomittari, muu laakeri tai laskulaite, tunnettu valmistaja*	12...15
Huippulaite, mekaaninen	5...8
Huippulaite, elektroninen	valm. suositus
Kytinkello, mekaaninen	6...12
Aikatariffikello, elektroninen	valm. suositus
Vko-vastaanotin, mekaaninen	10...12
Vko-vastaanotin, elektroninen	valm. suositus

*) Jos valmistaja on ennestään tuntematon, on suositeltavaa määrittää sopiva huoltoväli näytetarkastusmenettelyn avulla.

Elektronisten laitteiden kohdalla ei voida antaa yleispäteviä ohjeita, vaan kunkin laitteen kohdalla on syytä noudattaa valmistajan suosituksia mahdollisista virityksen tarkastusväleistä tai huollon tarpeesta. Useat valmistajat ilmoittavat, että heidän valmistamansa elektroninen laite (ml. elektroniset mittarit) ei kaipaakaan lainkaan huoltoa. SLY suosittelee kuitenkin näytetarkastusmenettelyn soveltamista kokemuksen kartuttamiseksi ja edelleen kokemuksen hyväksikäyttämistä arvioitaessa laitteiden, jotka eivät periaatteessa huoltoa kaipaa, huollon tarvetta. Myös mitattavan energia määrä ja mittarin tarkkuusluokka on syytä ottaa huomioon huoltovälejä määritettäessä.

Induktiomittarin huollossa suoritettavia toimenpiteitä ovat muun muassa:

- jännitekelojen mittaussuomien Ω -mittarilla
- laskulaitteen puhdistaminen ja voitelu
- laakerien tarkastus, puhdistus, voitelu ja osien vaihto valmistajan ohjeiden mukaan
- ankkurilaitteen tarkastus ja osien vaihto
- kokoaminen
- mittarin viritys
- sinetöinti

5.5.2 Näytetarkastusmenettely

Käytössä olevien mittarien näytetarkastuksessa jokaisen tutkittavan mittarin tarkastustuloksia verrataan asetettuihin vaatimusrajoihin. Päätös tutkittavana olevan mittarijoukon kohtalosta päätetään virheelliseksi todettujen mittarien lukumäärän osuudesta koko tutkitusta joukosta.

Tarkastuksen kohteeksi otettava joukko rajataan niin, että siihen kuuluu vain yhden valmistajan tietyn tyyppisiä laitteita, jotka on valmistettu enintään kolmen peräkkäisen vuoden aikana tai on vastaavasti huollettu samana ajankohtana.

Tarkastettava joukko valitaan satunnaisesti niin, että ne edustavat hyvin tarkastettavaa mittarijoukkoa ja mahdollisesti vaihtelevia asennusolosuhteita. Mikäli tarkastuksen kohteena oleva joukko on pienempi kuin 90, tarkastetaan kaikki yksilöt, suuremmista joukoista valitaan sopiva otos.

Jos tarkastuksessa löytyy liiaksi virheelliseksi todettavia mittareita suhteessa tarkastetun otoksen kokoon, koko mittarijoukko, jota otos edustaa, otetaan huoltoon tai poistetaan käytöstä. Mittaustulosten keskiarvot ja keskihajonnat on myös syytä laskea, sillä niiden avulla voidaan arvioida tarkkuuden kehitystrendejä ja tulevien näytetarkastuksien ja huoltojen ajankohtia.

Näytetarkastuksessa tarkastettavien mittarien määrän on oltava niin suuri, että tulosta voi pitää tilastollisesti luotettavana. Mikäli näytetarkastusmenettelyä sovelletaan sähkölaitoskohtaisesti, on mittarijoukko usein niin pieni ja hajanainen, että otosta ei ehkä voida valita lainkaan tai otoksen prosentuaalinen osuus koko joukosta on varsin suuri. Menettelyn kustannukset mittaria kohti olisivat pienissä sähkölaitoksissa huomattavasti suuremmat kuin suurissa laitoksissa.

Jos menettelyä sovellettaisiin valtakunnallisesti, olisivat mittarijoukot huomattavasti suurempia ja otos saataisiin valitsemalla tarkastettavat mittarit koko

valtakuntaa kattavasti. Jokaisen sähkölaitoksen mittareista tarkastettaisiin laitoksen sen tyyppisen mittarin lukumäärään verrannollinen otos. Koska koko valtakunnan joukko olisi huomattavan suuri, riittäisi tilastollisesti luotettavan tuloksen saamiseksi varsin pieni osuus koko joukosta, esimerkiksi 1...3%. Menettelyn kustannukset mittaria kohti olisivat samat kaikissa laitoksissa.

Esimerkki:

Lasketaan mittarijoukon, jonka koko on 50 000 kpl, näytetarkastusmenettelyn kustannukset sähkölaitoskohtaisessa ja valtakunnallisessa otoksen valinnassa erityyppisissä sähkölaitoksissa. Oletetaan, että mittarit ovat jakautuneet sähkölaitoksiin niiden kuluttajien lukumäärän suhteessa (kuluttajia kaikkiaan 2,6 miljoonaa). Otos tarkastetaan ensimmäisen kerran 16 vuoden kuluttua ja sitten aina 5 vuoden välein, otoskoot Sähkölaitosyhdistyksen ohjetta [21] interpolomalla soveltaen. Yhden tarkastuksen hinnaksi oletetaan 180 mk, korkokanta 10%.

Laitos 1:	kuluttajia n. 200 000	mittareita 3850	otos1 250	otos2 96
Laitos 2:	kuluttajia n. 80 000	mittareita 1540	otos1 160	otos2 38
Laitos 3:	kuluttajia n. 15 000	mittareita 290	otos1 64	otos2 7
Laitos 4:	kuluttajia n. 5 000	mittareita 96	otos1 40	otos2 2

Näytteenottomenettelyn kustannusten nykyarvo K sähkölaitosta kohden saadaan yhtälöstä (21):

$$K = \frac{m_o}{m} h \sum_t \left(1 + \frac{p}{100}\right)^{-t} \quad (21)$$

missä:

K = kustannusten nykyarvo

m_o = otoksen koko

m = mittarin lukumäärä ao. laitoksessa (3850, 1540, 290 tai 96)

h = yhden tarkastuksen hinta (180 mk)

p = korkoprosentti (10%)

t = 16, 21, 26, 31, 36, 41

Sähkölaitoskohtainen näytetarkastusmenettelyn (otos1) kustannusten nykyarvoksi mittaria kohti saadaan:

Laitos 1:	5 mk / mittari
Laitos 2:	9 mk / mittari
Laitos 3:	25 mk / mittari
Laitos 4:	41 mk / mittari

Valtakunnallisessa menettelyssä (otoksen 2 koko yhteensä 1250 kpl, 2,5%) kustannusten nykyarvo on noin 2,5 mk mittaria kohti. Nykyarvo on sama kaikissa laitoksissa. Valtakunnallisessa näytteenottomenettelyssä kustannussäästöä syntyy kaikissa laitostyypeissä. Ero on suurin pienissä laitoksissa.

Taulukko 15. Eri sähkölaitoksille aiheutuneet kustannukset mittarierän käyttöaikana sähkölaitoskohtaisessa ja valtakunnallisessa näytteenotossa.

	sähkölaitoskohtainen	valtakunnallinen
Laitos 1	19 000 mk	10 000 mk
Laitos 2	14 000 mk	4 000 mk
Laitos 3	7 000 mk	700 mk
Laitos 4	3 900 mk	240 mk

Pienet sähkölaitokset voisivat päästä mittarikohtaisissa kustannuksissa suurempien laitosten kanssa samanlaiseen asemaan tekemällä yhteistyötä. Usean pienen laitoksen mittareista voisi yhdistää yhtenäisiä joukkoja, joiden näytetarkastus olisi pieniä ryhmiä edullisempaa. Säästö olisi sitä suurempi, mitä suurempia yhteistyöalueita muodostuisi. Kaikkein edullisin yhteistyöalue Suomessa olisi koko valtakunta, kuten huomataan vertaamalla suuren laitoksen sähkölaitoskohtaisia ja valtakunnallisen näytetarkastusmenettelyn kustannuksia.

Näytetarkastus soveltuu, kuten kappaleessa 5.5.1 on todettu, staattisten mittareiden kunnonvalvontaan. Induktiomittarille tarpeellisen, 18 vuoden päästä suoritettavan, määräaikaishuollon kustannusten (huolto ja vaihto = 450 mk) nykyarvo on noin 81 mk. Näytetarkastus on siis varsin edullinen kunnon valvontatapa miten hyvänsä suoritettuna.

Tulevaisuudessa kWh-mittareiden pitoaika on ehkä lyhentymässä huomattavasti tariffien muuttumisen ja kehittymisen myötä. Yhä useampiin hintaluokkiin porrastetut tariffit vaativat aina monipuolisempia mittareita jolloin tariffin rakenteen muuttuessa tarvitaan uusi mittari ja mittarien pitoajat lyhenevät. Tämä aiheuttaa paineita myös näytetarkastuksen aikavälien muuttamiseksi.

Näytetarkastus ei ole merkittävä kustannus verrattuna muihin mittaroinnista aiheutuviin kustannuksiin verrattuna. Kustannuksia on vertailtu seuraavassa luettelossa:

	nykyarvo (hankintahinta)	vuosikustannus
Mittari	600 mk	61 mk
Asennus	250 mk	25,4 mk
Mittarinluku	98 mk	10 mk
Vioittumiset	10 mk	1 mk
Näytteenotto	<u>2,5 mk</u>	<u>0,25 mk</u>
	961 mk	98 mk

Korkoprosentti 10% ja pitoaika 44 vuotta (tällöin diskonttaustekijä on 9,83 ja annuiteettitekijä on 10,16%)

5.5.3 kWh-mittareiden tarkastaminen

kWh-mittareiden tarkastaminen on perinteisesti suoritettu sähkölaitosten mittaripajoissa. Tämä edellyttää mittarin vaihtamista jo ennestään huollettuun kuluttajan keskuksessa ja mittarin kuljettamista mittaripajalle. Siirto voi kuitenkin vaikuttaa mittarin ominaisuuksiin; siirretyn mittarin mittaustulokset eivät vält-

tämättä anna oikeata kuvaa mittarin toimintakunnosta mittauspaikalla.

Mittari voidaan kuitenkin tarkastaa myös käyttöpaikalla. Tällöin säästetään mittarin vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset ja vältetään siirtämisestä aiheutuva virhe tuloksiin. Kustannuksia aiheutuu kuitenkin tarvittavan mittalaitteen hankinnasta.

Kannettavalta kWh-mittarin tarkastuslaitteelta edellytetään riittävää tarkkuutta, mittalaitteen tarkkuusluokan on oltava huomattavasti parempi kuin tarkastettavien mittareiden. Tarkastustoimintaan soveltuisi mm. TKK:n Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratoriossa kehitteillä oleva sähköanalysaattori.

5.6 Mittarin rikkoontuminen

Mittarin rikkoontuminen johtuu tavallisesti ylijännitteestä, joka aiheuttaa läpi-lyönnin mittarin liitinlevyllä tai jännitekelan rikkoontumisen. Ylijännite esiintyy salamaiskun seurauksena ja rikkoo mittareita tavallisesti avojohtojen varsilta. AMKA-johdoilla ja taajamien kaapeliverkossa ilmastollisista ylijännitteistä johtuva mittarin rikkoontuminen on harvinaisempaa. Mittarin laskulaitteen pyörien on myös todettu olevan mahdollista jäädä väliasentoon, jolloin mittaminen estyy.

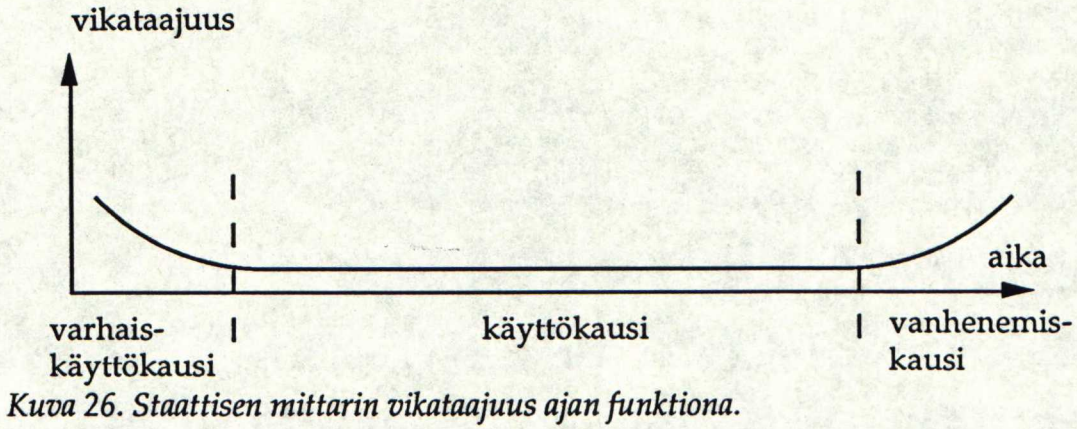
Uudemmat mittarityypit on varustettu itsediagnostiikalla, joka tutkii mittarin toimintaa ja antaa hälytyksen virhetilanteissa, esimerkiksi silloin kun jännitteistä puuttuu. Induktiomittareissa vianilmaisimena on vikavälkky ja staattisissa mittareissa LED-valo ja kosketintoiminta.

Vian ilmetessä mittari tutkitaan ja arvioidaan kulutettu energia edellisen lukemakerran jälkeen edellisten kulutustietojen, kuluneen ajan, vikatyypin ja mittarin lukeman perusteella.

Mittarin lisäksi vika voi sattua mittauskytkennässä, mittamuuntajassa tai jännitemuuntajan oikosulkusuojassa. Kun jännitemuuntajan oikosulkusuojana käytetään johdonsuojakatkaisijaa, saadaan sen apukoskettimelta hälytystieto oikosulkusuojan toimiessa. Sulaketta käytettäessä hälytystietoa ei tietenkään tule, ellei käytetä staattista mittaria, jossa hälytys saadaan diagnostiikan ohjaaman releen kosketintoiminnasta. Kytkennässä ja mittamuuntajissa tapahtuvat vikaantumiset lienevät varsin harvinaisia.

Induktiomittarin rikkoontuminen voi johtua myös vinosta asennusasennosta. Sen lisäksi että vinous aiheuttaa virhettä mittaukseen, tuhoaa se mittarin alalätkän. Induktiomittaria asennettaessa on siis tärkeää kiinnittää huomiota oikeaan asentoon. Suoruus on syytä tarkastaa esimerkiksi vesivaa'alla.

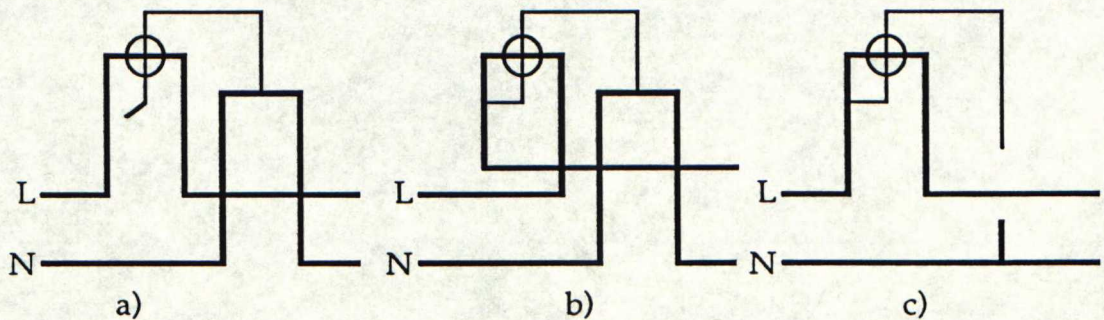
Staattisten mittarien, kuten muiden elektronisten laitteiden, vikaantuminen on luonteeltaan satunnaista. Vikaantumisen todennäköisyyttä kuvaa laitteen vika-taajuus, jonka on todettu kasvavan eksponentiaalisesti lämpötilan funktiona. Kuvassa (26) on esitetty staattisen mittarin vikataajuus ajan funktiona:



Vikataajuus on suurimmillaan eliniän alku- ja loppupuolella, keskivaiheilla vikataajuus on pienimmillään. Mittarit vanhennetaan valmistuksen jälkeen tehtaalla, jotta mahdolliset vikaantumiset varhaiskäyttökaudella tapahtuisivat ennen luovuttamista käyttäjälle. Vanhennus suoritetaan korkeassa lämpötilassa, jolloin vanheneminen tapahtuu nopeammin. Mittarit pyritään poistamaan käytöstä ennen kuin vikataajuus alkaa kasvaa vanhenemiskauden alussa.

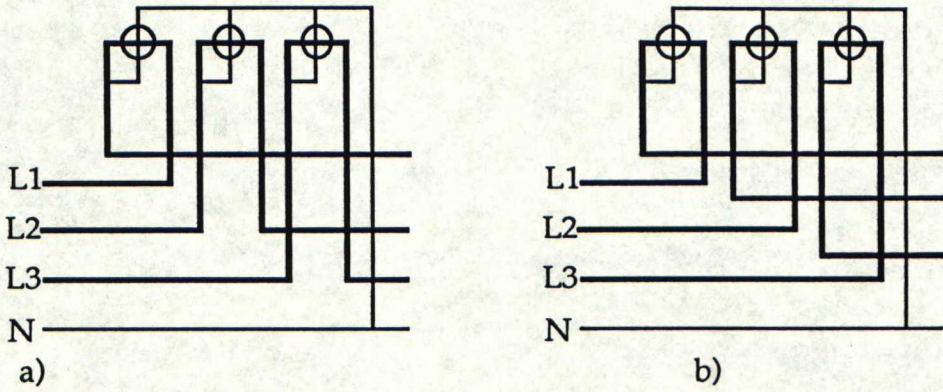
5.7 Virheellisesti suoritettu kytkentä

Kun kWh-mittari on kytketty väärin, mittaa mittari aina vähemmän kuin pitäisi, siis myyjän tappioksi. Useissa virheellisissä kytkennöissä mittari ei mittaa mitään. Tavallisimpia kWh-mittarin kytkennöissä esiintyviä virheitä havainnollistavat kuvat 27...29:



Kuva 27. Virheellisesti suoritettuja kytkentöjä yksivaiheisessa mittauksessa.

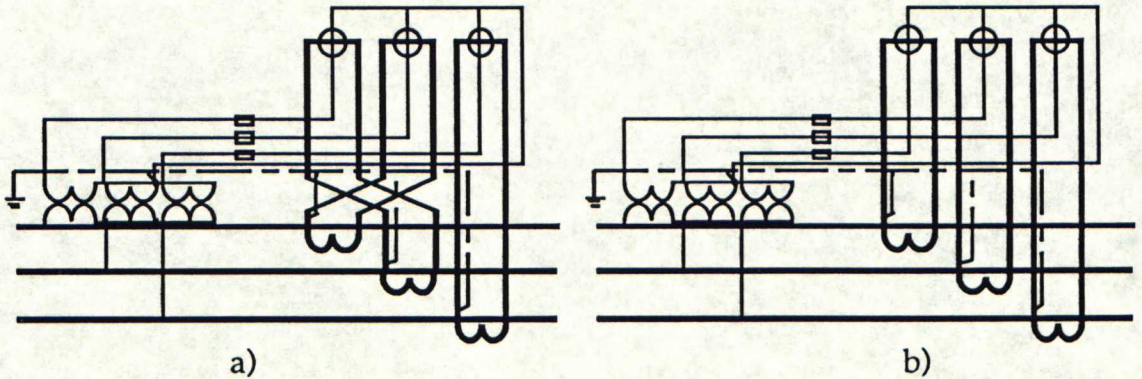
- a) jännitehaka auki
- b) tuleva ja lähtevä johdin kytketty väärin päin
- c) nollajohdin irti



Kuva 28. Virheellisesti suoritettuja kytkentöjä kolmivaiheisessa mittauksessa.

- a) yhden vaiheen tuleva ja lähtevä johdin kytketty väärin päin
b) kaikkien vaiheiden tulevat ja lähtevät johtimet kytketty väärin päin

Jos kolmivaiheisessa mittauksessa yhden vaiheen jännitehaka on jäänyt auki, mittari mittaa $2/3$ symmetrisestä kulutuksesta. Mikäli nollajohdin on jäänyt irti, ei mittaustulokseen synny käytännöllisesti katsoen lainkaan virhettä.



Kuva 29. Virheellisesti suoritettuja kytkentöjä kolmivaiheisessa epäsuorassa mittauksessa.

- a) kahden vaiheen virrat kytketty keskenään väärin päin
b) kaikkien vaiheiden virrat ja jännitteet kytketty symmetrisesti väärin

Kun kahden vaiheen jännitteet on kytketty keskenään väärin päin kuten virrat kuvassa (29a), muodostuu virhe samalla tavalla. Taulukossa 16 on koottu erityyppiset virheet ja mittarin tulos näillä kytkennöillä.

Taulukko 16. kWh-mittarin virhe erilaisilla virheellisesti suoritetuilla kytkennöillä.

Virhe	Kuva	Tulos
Jännitehaka auki	27 a	$W = 0$
Tuleva ja lähtevä johdin väärin päin	27 b	$W = -W_{\text{kok}}$
Nollajohdin irti	27 c	$W = 0$
Tuleva ja lähtevä johdin väärin päin yhdessä vaiheessa	28 a	$W = 1/3 W_{\text{kok}}$
Tuleva ja lähtevä johdin väärin päin kolmessa vaiheessa	28 b	$W = -W_{\text{kok}}$
Jännitehaka auki yhdessä vaiheessa kolmesta		$W = 2/3 W_{\text{kok}}$
Nollajohdin irti		$W = W_{\text{kok}}$
Kahden vaiheen virrat (tai jännitteet) kytketty ristiin	29 a	$W = 0$
Kaikki virrat ja jännitteet symmetrisesti kytketty ristiin	29 b	$W = (-1/2 - \sqrt{3}/2 \times \tan\phi) \times W_{\text{kok}}$

5.7.1 Käänteinen vaihejärjestys

kWh-mittarit viritetään mittaamaan oikein myötäsuuntaisessa vaihejärjestyksessä. Mikäli mittari kytketään vastasuuntaiseen järjestykseen, voi mittaukseen syntyä ns. vaihejärjestysvirhe (kts. luvut 2.3.2 ja 4.5.2).

Virhe esiintyy ainoastaan induktiomittarilla. Mittarit viritetään esimerkiksi siten, että vaihejärjestysvirhe on enintään 1% käännetyssä järjestyksessä, kun mittari mittaa virheettä oikeassa vaihejärjestyksessä.

Vaihejärjestys todetaan mittarista liittimien numeroinnin perusteella ja sähköverkosta kentän kiertosuuntamittarin avulla.

Mittaristandardissa [2] sallitaan induktiomittarin näyttämään 2% virhe kun virta on pienempi kuin $0,5 I_b$ ja sitä suuremmilla virroilla 1,5%.

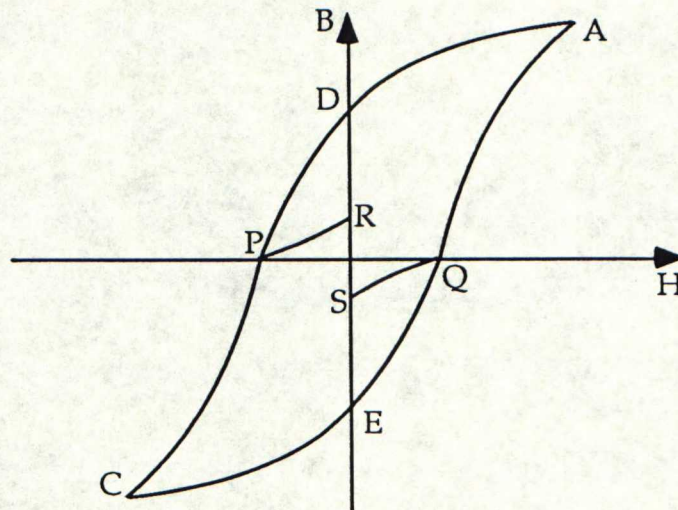
6 Mitattavasta kohteesta aiheutuvat ongelmat

6.1 Remanenssivuo virtamuuntajan rautasydämessä

6.1.1 Remanenssivuon syntyminen virtamuuntajaan

Remanenssivuo syntyy virtamuuntajan rautasydämeen vikavirtojen katkaisun yhteydessä. Virtamuuntajan magnetoimisvirta on resistiivisellä taakalla maksimissaan juuri silloin kun vikavirta katkeaa, jolloin jäljelle jäävä magneettivuokin on suurin. Remanenssivuon suuruus voi olla jopa 80% siitä magneettivuon tiheydestä, joka ko. materiaalille on mahdollista [10]. Myös tehomuuntajien kytkentäsäysvirta voi aiheuttaa remanenssia eli jäännösmagnetismia.

Resistiivisellä taakalla virta katkeaa silloin, kun magneettikentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys ovat hystereesikäyrän käännepisteissä A tai C, kuva (30). Jotta toimintapiste voisi säilyä A:ssa tai C:ssä, tulisi muuntajassa kulkea tasavirta, joka ylläpitäisi tarvittavaa kentänvoimakkuutta. Tasavirran aikaansaamiseksi sydämen vuon on vähennettävä, jolloin toimintapiste kulkee hystereesikäyrää pitkin kunnes tasapaino saavutetaan (pisteessä D tai E) [22].

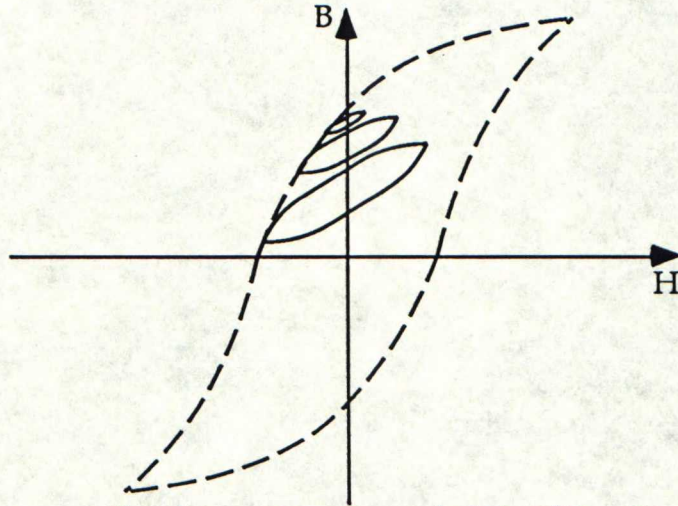


Kuva 30. Magneettisen materiaalin hystereesikäyrä. B = magneettivuontiheys, H = magneettikentän voimakkuus.

Puhtaasti induktiivisella taakalla virta katkeaa pisteessä P tai Q ja tasapaino saavutetaan vastaavasti pisteessä R tai S. Muilla taakan tehokertoimilla tasapainopiste sijaitsee joko välillä R...D tai S...E. Koska mittaustarkoituksissa käytettävissä virtamuuntajissa magneettivuontiheydet ovat suhteellisen suuria verrattuna kyllästymisvuontiheyteen jo normaaleissa käyttöolosuhteissa, on todennäköistä, että sydän kyllästyy vikatilanteissa. Tällöin vikavirtaa katkaistaessa sydämeen jää suuria remanenssivoita.

6.1.2 Rautasydämen demagnetoituminen

Kun virtamuuntajan rautasydäntä aletaan vikatilanteen selvittämisen tms. jälkeen magnetoimaan normaalilla kuormituksella, aiheuttaa remanenssi muutoksia virtamuuntajan toimintaan, ts. sydämen vuon muutokset eivät noudata samankaltaista hystereesisilmukkaa kuin remanenssittomassa tilanteessa. Jos virtamuuntajan ensiövirrassa ei ole pysyvää tasakomponenttia, on hystereesisilmukan sijaittava symmetrisesti B-akselin suhteen. Magnetointivirran negatiiviset ja positiiviset puolijaksot aiheuttavat hystereesisilmukan siirtymisen kohti B/H -diagrammin keskustaa [22], kuva (31):



Kuva 31. Hystereesisilmukan siirtyminen kohti B/H -diagrammin origoa, kun virtasydämen magnetointia kasvatetaan.

Virran ajoittainen pieneneminen ja suureneminen ei vaikuta remanenssiin, ainoastaan suurin remanenssin syntymisen jälkeen saavutettu virta vaikuttaa remanenssin vähenemiseen.

Vaihtomagnetointi vähentää remanenssia hyvin nopeasti ja tehokkaasti. Remanenssin väheneminen erittäin pieneksi edellyttää sellaista vaihtomagnetoinnin huippuarvoa, joka vastaa noin puolta siitä vuontiheydestä, joka kyllästäisi sydämen [23]. Tapahtuma kestää enintään joitakin sekunteja.

Vaihtomagnetoinnin aiheuttaman remanenssin vähenemisen lisäksi muuntajan mekaaninen värinä ja magnetostriktio vähentävät useiden tuntien kuluessa hieman remanenssia. Tämä väheneminen on kuitenkin huomattavasti vähämerkityksisempää kuin virran aiheuttama väheneminen.

Virtamuuntajan mitoitus vaikuttaa remanenssin poistumiseen rautasydäimestä. Ensinnäkin virtamuuntajan muuntosuhde ei saa olla liian suuri. Kun virtamuuntajan nimellisensiövirta on liian suuri suhteessa kuormavirtoihin, ei muuntajan toisiossa kulje suhteellisen suuria virtoja niin usein kuin jos muuntosuhde olisi pienempi. Tällöin remanenssin poistuminen vaihtomagnetoinnin vaikutuksesta vähenee.

Toiseksi virtamuuntajan toisiotaakan tulisi olla lähestulkoon nimellistään suuruinen. Kun toisioon kytkettävä impedanssi suurenee, poikittais-

haaran ja po. taakan impedanssien suhde pienenee ja poikittaishaaran virta suurenee virranjaon muuttumisen seurauksena. Poikittaishaaran virran kasvaessa vaihtomagnetoinnin aiheuttama magneettivuo rautasydämessä kasvaa ja remanenssin väheneminen edistyy.

Suojaustarkoituksiin käytettävien virtamuuntajien mitoitus on erilainen kuin mittaustarkoituksiin käytettävien; niiden tulee toistaa oikein oikosulkuvirratkin. Tästä syystä normaalit kuormavirrat eivät kykene demagnetoi-
maan suojaustarkoituksiin sydäntä niin tehokkaasti kuin mittaussydäntä.

6.1.3 Remanenssin vaikutus virtamuuntajan toimintaan

Vaihtomagnetoinnin aiheuttaman vähenemisen jälkeen jäljelle jäävä remanenssi aiheuttaa muutoksia virtamuuntajan toimintaan. Rautasydämen, jonka hystereesisilmukka sijaitsee H-akselin suhteen epäsymmetrisesti, keskimääräinen permeabiliteetti on pienempi kuin saman sydämen silloin, kun silmukka sijaitsee symmetrisesti ts. remanenssittomassa tapauksessa. Tästä syystä muuntajan magnetointivirta (ja virhe) on tällöin suurempi.

Englannissa suoritetuissa tutkimuksissa [22] todettiin permalloy-C -sydämiin virtamuuntajaan syntyvän 0,03% virhe muuntosuhteeseen ja 0,9 min virhe vaihekulmaan, kun remanenssivuontiheys oli 0,33 T ja vaihtomagnetoinnin huippuarvo 0,3 T ($I = 0,5 \times I_b$). Magnetointivirta oli tällöin 3% suurempi kuin normaalisti.

Remanenssi kasvattaa siis merkittävästi virtamuuntajan magnetointivirtaa. Magnetointivirran osuus ensiövirrasta on kuitenkin niin pieni, että muutaman prosentin muutokset siinä eivät aiheuta merkittävää virhettä virtamuuntajan toisiovirtaan.

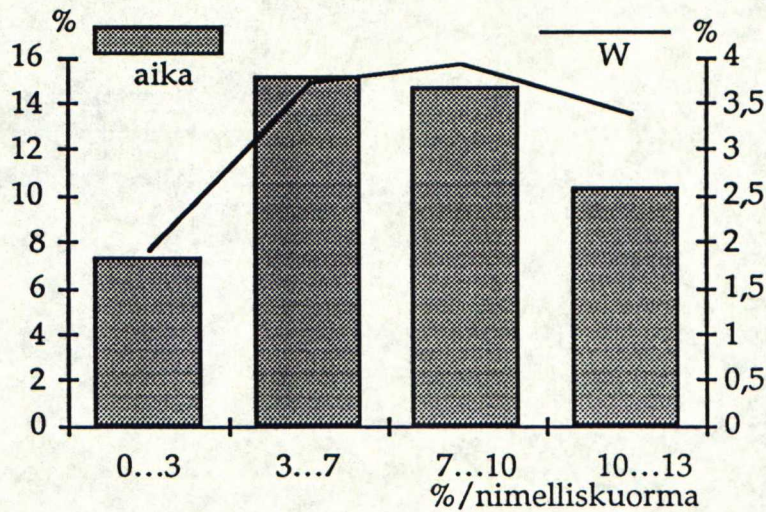
Mittausvirtamuuntajan kyllästymiseen remanenssilla ei ole käytännössä vaikutusta. Mikäli hyvin suuri virta kulkee muuntajan ensiössä, demagnetoi se sydämen, jolloin kyllästymisen riippuu pelkästään virran suuruudesta ja taakasta.

6.2 Pienten kuormien mittaaminen

kWh-mittarin mittaama kuormitus on, erityisesti kotitalouksissa, joissa lämmitys ei tapahdu sähköllä, hyvin suuren osan ajasta vähäistä. Alle 10% kuormituksen osuus voi olla 53% ajasta ja 13% kulutuksesta. Kuvassa (32) on esitetty pylväillä aika, jonka kulutus on tietyllä kuormitusalueella ja viivalla po. alueen osuus (W) mitatusta kokonaisenergiasta. Sähkölämmitteissä kotitalouksissa ja muissa kulutustyypeissä pienten kuormien osuus on huomattavasti pienempi.

kWh-mittarin käyntiinlähtökuorma on 0,5% nimelliskuormasta, tätä pienempiä kuormituksia mittari ei mittaa. Kuluttaja saa siis hyvin pienet kuormitukset ilmaiseksi (jos kiinteää maksua ei huomioida). 0,5% kuormitus vastaa noin 12 VA:a kun nimellisvirta on 10 A. Näin pienen kuormi-

tuksen aiheuttavat laitteet lienevät erittäin harvinaisia, yhden pienloistelampun kuormituskin on vähintään noin 22 VA ($\cos \varphi = 0,54 \text{ ind}$) [25].



Kuva 32. Pienten kuormien osuus ajassa ja energiassa muuten kuin sähköllä lämmitettävissä kotitalouksissa [24].

Käyntiinlähtökuormitusta (0,5% nimelliskuormasta) suuremmilla, mutta alle 13% kuormituksilla kWh-mittarin virhe on suurempi kuin lähellä nimellisvirtaa olevilla kuormituksilla. Induktioimittarilla virhe johtuu lähinnä jännitekäytön aiheuttamasta vääntömomentista ja liikevastuksista. Virhe on suuruudeltaan noin +5% kun kuormitus on 1...2% nimelliskuormasta ja noin -5% kun kuormitus on 0,6% nimelliskuormasta [26].

Staattisen mittarin virhe pienillä kuormilla on pienempi kuin induktioimittarilla, alle 0,5% kun kuormitus on 0,5%...13%. Käyntiinlähtökuorma on tyhjäkäynnin estämisen varmistamiseksi säädetty samaksi kuin induktioimittarilla.

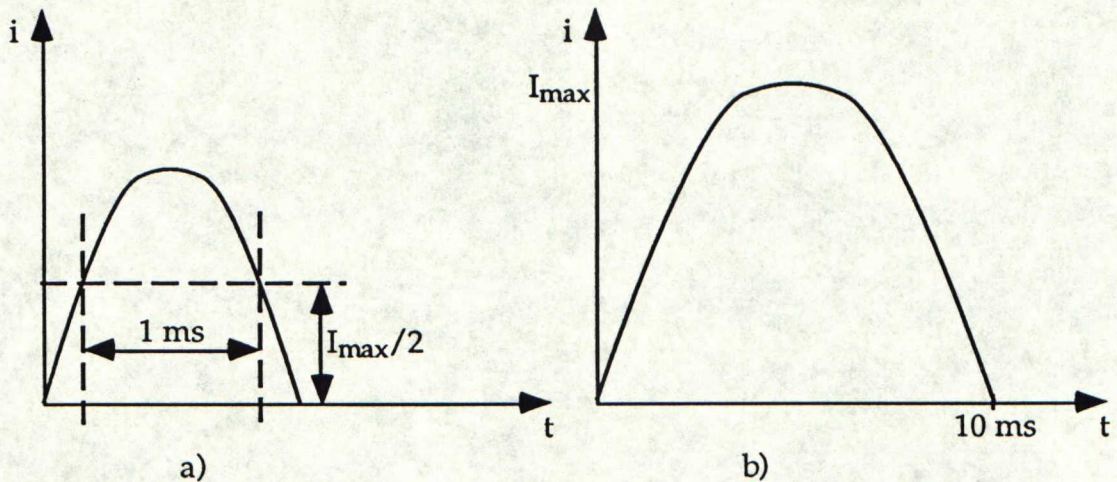
6.3 Ylivirtojen vaikutus mittalaitteisiin

Sähköenergian mittauslaitteet ovat alttiina ylikuormituksille ja mitattavassa kohteessa esiintyvien vikojen aiheuttaville vikavirroille. Mittarin tulee mitata kohtuullisen tarkasti kuormituksilla, joilla mittarin maksimivirta ei ylitä. Mittaristandardien mukaan mittarien on kestävä ylivirtoja seuraavan taulukon mukaisesti:

Taulukko 17. kWh-mittarilta standardeissa edellytetty oikosulkukestoisuus, virran kesto aika 0,5 s.

Mittarityyppi		virtakestoisuus
Induktioimittari	$I_b = 10 \text{ A}$	300 A
Induktioimittari	$I_b > 10 \text{ A}$	$20 \times I_b$
Induktioimittari	epäsuora mittaus	$10 \times I_b$
Staattinen mittari lk 0,5 S tai 0,2 S		$12 \times I_b$
Staattinen mittari lk 2 tai 1	suora mittaus epäsuora mittaus	$30 \times I_{\max}$ $20 \times I_{\max}$

Lähteessä [20] on esitetty tutkimustuloksia kokeista, joissa mittareiden oikosulkukestoisuutta koestettiin lyhytaikaisilla oikosulkuvirroilla. Virran suuruus oli 1 ms ajan vähintään puolet virran huippuarvosta, kun virran huippuarvo oli välillä 0...8 kA, kuva (33a) ja sitä suuremmilla arvoilla virta kesti puolijakson ajan (10 ms), kuva (33b).



Kuva 33. Virtarasitus käyrämuodossa tutkittaessa induktiomittarin oikosulkukestoisuutta.

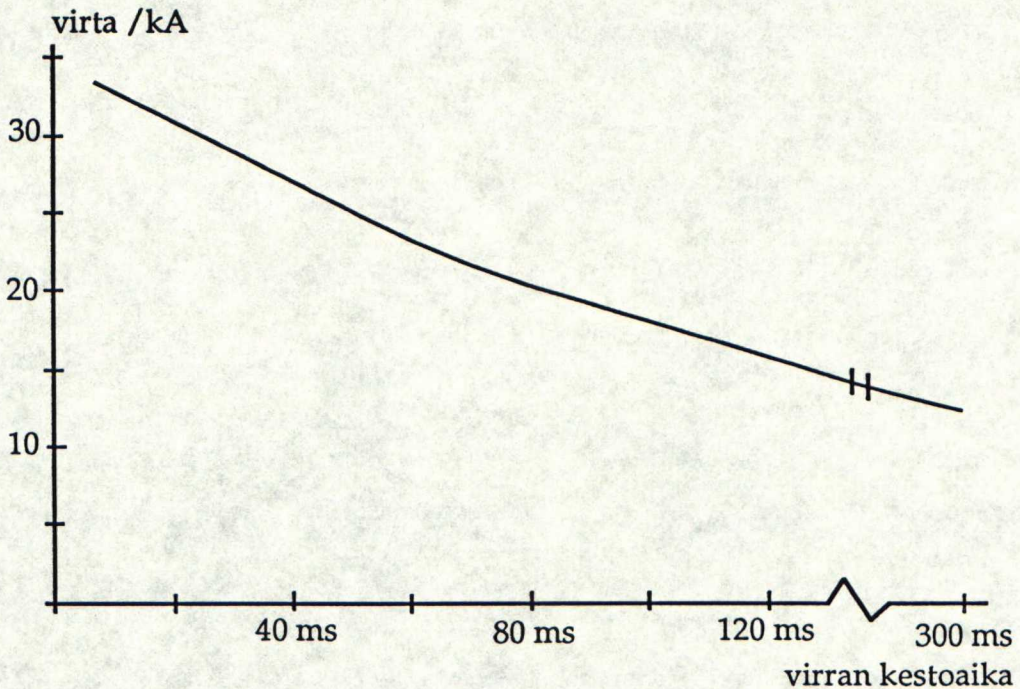
Kokeissa todettiin mittarien kestävän hyvin alle 8 kA ($200 \times I_{\max}$) virtoja. Ainoastaan pieniä (-1...-2%) virheiden lisääntymisiä havaittiin. Virhe aiheutuu virtamagneetin rautasydämen magneettiominaisuuksien muutoksista (remanenssi). Suhteellisen voimakas vaihtomagneetti demagnetoi sydämen virtamuuntajien tapaan. Tarpeellisen vaihtomagnetoinnin suuruus vastaa noin puolta mittarin maksimivirrasta.

8 kA suuremmilla virroilla virtakelan aiheuttama voimakas magneettikenttä aiheutti muutoksia jarrumagneetin ja magneettisen laakerin ominaisuuksiin. Muutokset jarrumagneetissa heikensivät jarrun aiheuttamaa pyörimistä hidastavaa vääntömomenttia ja aiheuttivat siten positiivisen virheen (noin 2%, kun $I=300 \times I_{\max}$).

Mittareissa, joissa on magneettinen laakeri, yli 8 kA virrat tuhosivat polaa-kerin. Kun laakeri ei enää kyennyt kannattamaan ankkuria, pyöriminen lakkasi. Hyvin suuret ($500...600 \times I_{\max}$) virrat aiheuttavat niin suuria voimia, että ne muuttavat ankkurin ja käämien muotoja ja murtavat johtimien liittimiä.

Toisessa lähteessä [27] esitettiin tuloksia tutkimuksesta, jossa oli tutkittu virran kestoajan ja virran suuruuden vaikutusta. Tutkimuksessa todettiin mittarin tuhoutumisen johtuvan virran lämpövaikutuksesta, kun virran kesto-aika oli yli 100 ms (6 jaksonaikaa). Noin 30...70 ms virran kestoajoilla tuhoutuminen johtui lämmön ja voiman yhteisvaikutuksesta. Lyhyimmillä kestoajoilla tuhoutuminen oli seurausta virran aiheuttamista suurista voimista.

Virran suuruuden, joka johtaa mittarin tuhoutumiseen, todettiin riippuvan sen kestoajasta: lyhyen ajan mittari kestää hieman suurempiakin virtoja, kuva (34).



Kuva 34. Induktiomittarin tuhoutumiseen johtavan virran suuruuden riippuvuus virran kestoajasta.

Käytännössä mittarit eivät joudu alttiiksi näin suurille virroille, sillä suorassa mittauksessa oikosulkusuojana toimivat enintään 63 A sulakkeet ja johdonsuojakatkaisijat rajoittavat virrat noin 10 kA tasolle [10]. Näin suuret virrat voivat periaatteessa rikkoa magneettisella laakerilla varustetut kWh-mittarit, mutta käytännössä oikosulkuvirrasta johtuvat mittarien rikkoutumiset ovat erittäin harvinaisia.

Virtamuuntajat säilyttävät tarkkuutensa standardin mukaan 1,2 -kertaiseen nimellisvirtaan saakka. Oikosulkuvirtakestoisuus on kiloampeerien luokkaa, esimerkiksi $I_{th} = 60 \times I_b$, $I_{dyn} = 2,5 \times I_{th}$. Epäsuorassa mittauksessa virtamuuntajan kyllästyminen rajoittaa toisiovirtaa ja siten suojelee mittaria suurilta virroilta.

6.4 Kuormitusten epätasainen jakautuminen eri vaiheille

Mittaristandardeissa sallitaan kolmivaiheisen mittarin näyttämään lisävirhettä mitattaessa yksivaiheista kuormitusta 0,1...1% tarkkuusluokasta riippuen.

Kolmivaiheinen kWh-mittari sisältää periaatteessa kolme yksivaiheista mittaria ja yhden, yhteisen laskurin. Kolmivaiheinen mittari siis mittaa yksivaiheisen kulutuksen oikein yksivaiheisen mittauksen tarkkuuden rajoissa.

Tarkkuutta heikentää kuitenkin huonohko mittaustarkkuus pienillä kuormilla (kuormituskäyrä) ja induktiomittarilla epäsymmetrian mahdollisesti aiheuttama vaihejärjestysvirhe (luku 4.5.2).

6.5 Virran tasakomponentti

Erilaisten moottorien tms. tehonsäätölaitteet (suuntaajat) ottavat sähköverkosta tasavirtaa epäsymmetrisen tasasuuntauksen seurauksena. Epäsymmetria voi johtua suuntaustavasta (puoliaaltotasasuuntaus) tai ohjauspiirien epäideaalisesta toiminnasta (ks. kuva (22)). Toinen merkittävä tasakomponentin aiheuttaja on sähkökäyttö, jossa säädetään tehoa katkaisemalla virta hetkeksi (pulse-burst -modulation). Tällöin kuormavirrassa esiintyy piirin induktansseista johtuva transientti tasavirta. Virrassa on tasakomponentti myös silloin, kun kussakin pulssissa on eri lukumäärä negatiivisia ja positiivisia puolijaksoja.

Kuten luvussa 4.5.1 todettiin, induktiomittari ei mittaa tasakomponentin sisältämää energiaa, jolloin induktiomittarin näyttämään syntyy tasakomponentin sisältämän energian ja kokonaisenergian suhteeseen verrannollinen virhe. Staattinen mittari mittaa tasakomponentin energian oikein, jos sen virran- ja jännitteenmittauspiirit soveltuvat tasakomponentin mittamiseen (luku 2.4.4).

Virtamuuntajan kuormavirrassa esiintyvä tasakomponentti vaikuttaa huomattavasti virtamuuntajan toimintaan. On myös huomattava, että staattisissa mittareissa on usein virranmittauspiirissä virtamuuntaajat, joihin vaikuttavat samat ongelmat kuin mittarin ulkopuolella oleviin virtamuuntajiin.

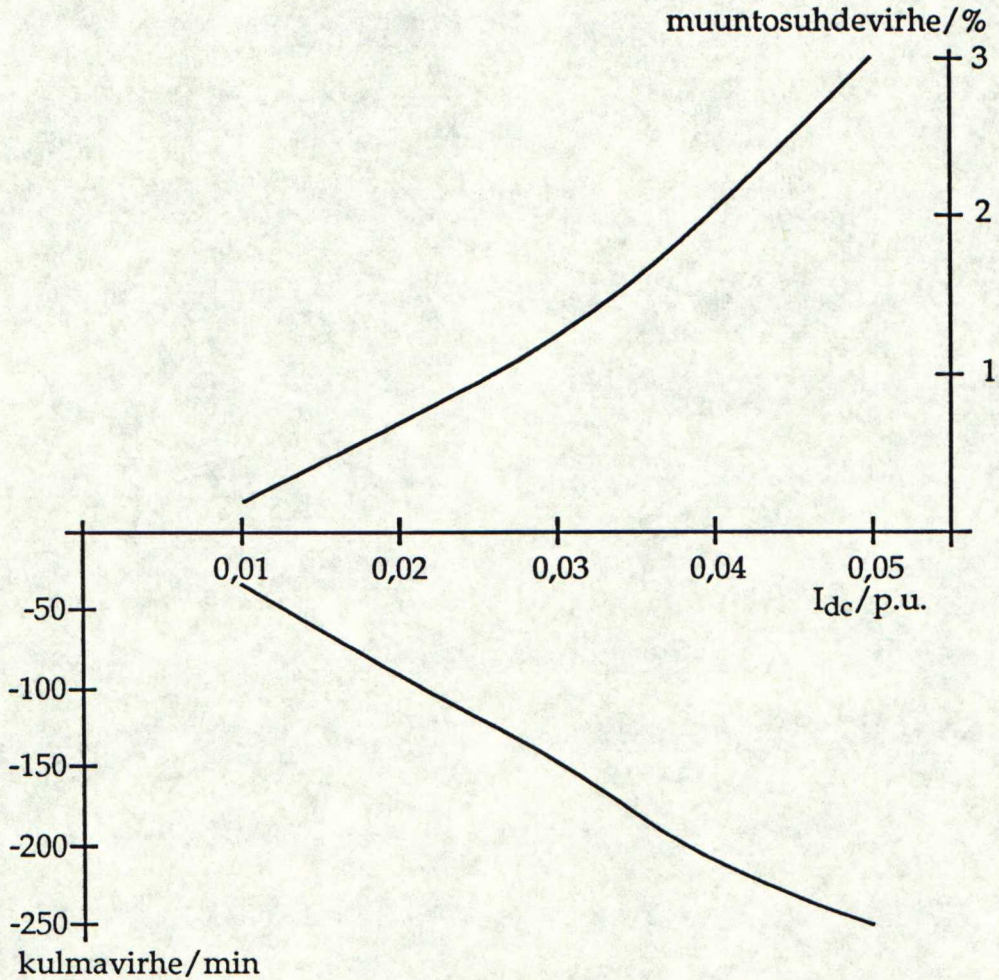
Tasakomponentin vaikutuksesta virtamuuntajan rautasydämen magnetointi muuttuu, ts. sen uran, jonka sydämen vuon tiheyden ja kentän voimakkuuden arvoparit muodostavat B/H-tasossa (hystereesisilmukka), paikka ja muoto B/H -tasossa muuttuu. Muutos tapahtuu samoin kuin remanenssin vaikutuksesta (luku 6.1) sillä erotuksella, että muutos ei palaudu niin kauan kuin tasavirtaa esiintyy.

Ensiössä kulkeva tasavirta ei voi toistua toisiopuolella, se on siis kokonaisuudessaan magnetointivirtaa. Toisiovirran tehollisarvo ei siten ole muuntajan muuntosuhteen mukainen. Toision vaihtovirtakomponentti ei myöskään toistu virheettä: tasavirran vaikutuksesta rautasydämen magneettinen reluktanssi pienenee, josta on seuraksena ensiö- ja toisiovirtojen vaihe-erojen kasvu [28]. Mikäli tasakomponentti on niin suuri, että se kylästä sydämen, on virhe erittäin suuri.

Tasavirran aiheuttamat muutokset virtamuuntajan toimintaan riippuvat useista tekijöistä:

- virran tehollisarvosta; suurilla tehollisarvoilla suhteessa yhtä suuri tasavirta ($I_{dc}/I_{ac} = \text{vakio}$) aiheuttaa suuremman virheen.
- tasavirran suuruudesta suhteessa tehollisarvoon; tasakomponentin kasvaessa virhe suurenee.

-taakan tehokertoimesta; tehokertoimella 1 kulmavirhe on suuri ja muuntosuhdevirhe pieni ja tehokertoimella 0,5 ind päinvastoin. Kun taakka on noin 0,8 ind, ovat sekä kulma- että muuntosuhdevirhe suuria [18].



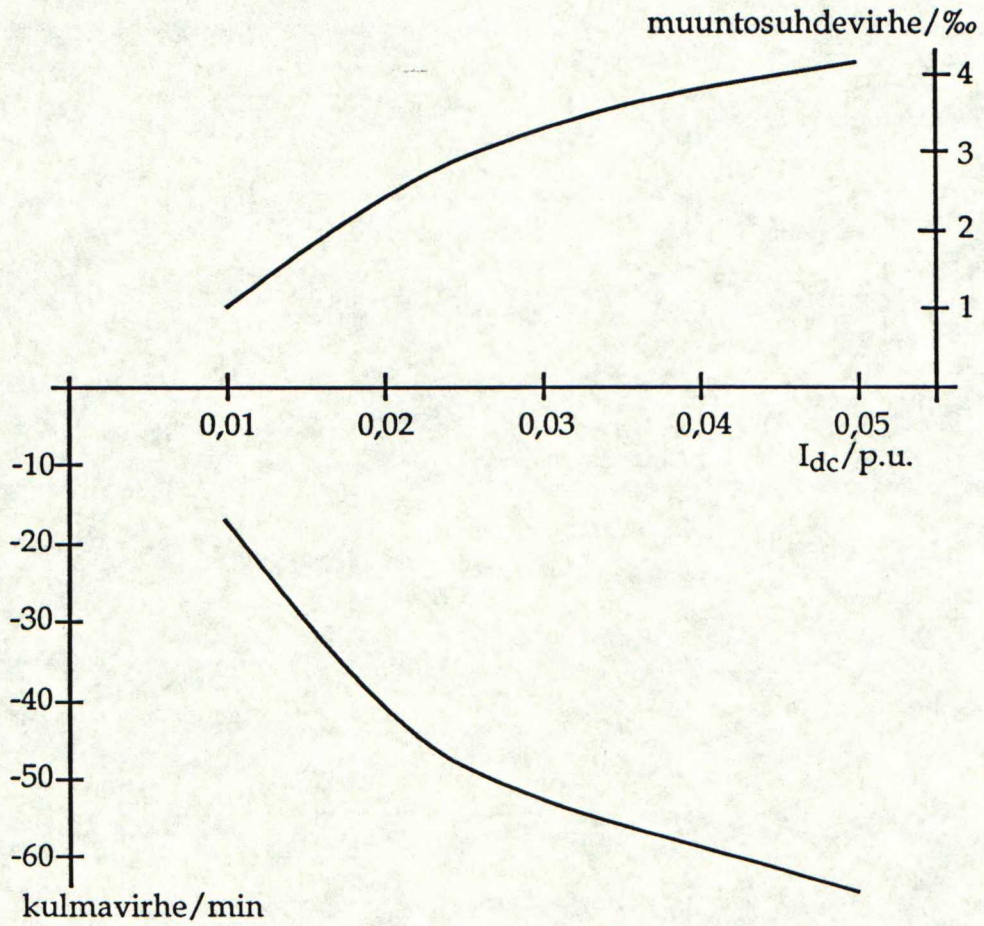
Kuva 35. Virtamuuntajan virheen riippuvuus tasakomponentista pienellä virralla [19]. Virran tehollisarvo on 0,143 p.u. ja tasakomponentti on 0,01...0,05 p.u.

Suuremmilla virran tehollisarvoilla absoluuttisesti samansuuruinen tasakomponentti ($I_{dc}/I_{ac} \neq \text{vakio}$) aiheuttaa vähemmän virhettä, kuva (36). Kuvat (35) ja (36) eivät esitä saman virtamuuntajan mittaustuloksia, mutta kylläkin saman tarkkuusluokan muuntajien (yhdysovalainen class 0,3).

0,05 p.u. tasakomponentti aiheuttaa kuvan (36) tapauksessa yhteensä 1,3% virheen energiamittaukseen ($\cos \varphi = 0,9$ ind), kun suurin sallittu virhe tässä tarkkuusluokassa olisi 0,7%. Pienemmillä kuormituksen tehokertoimilla virhe on vielä suurempi: kun $\cos \varphi = 0,5$ ind, virhe on jo noin 3,5%.

Kuormavirtaan superponoitunut tasavirta huonontaa siis merkittävästi virtamuuntajien tarkkuutta ja aiheuttaa siten varsin suuren virheen energian mittaamiseen. Sekä sähkön laadun että sähköenergian mittaustarkkuuden kannalta on tärkeää, että vältetään laitteita, jotka ottavat sähköverkosta tasavirtaa taikka muuten estetään tasakomponentin esiintyminen sähköverkossa. Loistehon kompensointi ennen mittausta pienentää tasa-

komponentin aiheuttamaa virhettä mittaukseen, sillä kulmavirheestä aiheutuva $\cos \varphi$:n muutos on pienempi, kun kuormituksen tehokerroin on suurempi. Myös mittarien tarkkuus on hieman parempi suurilla tehokerroimilla.



Kuva 36. Virtamuuntajan virheen riippuvuus tasakomponentista suurella virralla $I = 1$ p.u. [28].

7 Loppuyhteenvedo

Suurimmiksi ongelmiksi sähköenergian mittaamisessa osoittautuivat virran tasakomponentti, jännitteen ja virran yliaaltosisältö sekä kWh-mittarien virhe alhaisissa lämpötiloissa ja hyvin pienillä kuormilla ja virheellinen mittamuuntajien valinta.

Virran tasakomponentti aiheuttaa sekä merkittävän kulma- että virtavirheen virtamuuntajan toisiovirtaan. Tasakomponentin sisältämää energiaa mittarit eivät mittaa, sillä tasakomponentti ei toistu mittamuuntajien toisiopuolella eikä se aiheuta vääntömomenttia induktiomittarin roottoriin. Toisiovirran vaihtokomponenttiin syntyvä virhe aiheuttaa merkittävän virheen mittaukseen, kun tasakomponentti on prosenttien luokkaa virtamuuntajan nimellisvirrasta. Suuri tasakomponentti kyllästää mittamuuntajan, jolloin virhe energian mittauksessa voi olla hyvin suuri. Jännitteen tasakomponentti ei aiheuta niin suurta virhettä kuin virran tasakomponentti.

Induktio mittari mittaa huonosti muulla kuin perustaajuisella taajuudella siirtyvän energian. Tavallisimmilla yliaaltotaajuuksilla (150, 250 ja 350 Hz) induktio mittari mittaa noin puolet energiasta. Virheen suunta riippuu perustaajuisen ja yliaaltojen taajuuksilla siirtyneiden suunnista: silloin kun suunta on sama, on virhe negatiivinen (ostajan hyväksi) ja silloin kun suunta ovat päinvastaiset, virhe on positiivinen (myyjän hyväksi). Yliaaltoenergian aiheuttaman virheen taloudellinen etu sille osapuolelle, jonka hyödyksi virhe on, on pieni verrattuna sähköön laadun huononemista aiheutuneeseen haittaan. Yliaallot eivät juurikaan huononna perustaajuudella siirtyvän energian mittaustarkkuutta.

Staattiset mittarit ja mittamuuntajat toimivat varsin tarkasti suurillakin taajuuksilla. Yli 500 Hz taajuuksilla keskijännitejakeluverkon jännitemuuntajan virhe alkaa olla merkittävä.

kWh-mittarien tarkkuus alhaisissa lämpötiloissa ($< -20\text{ }^{\circ}\text{C}$) on huonompi kuin huoneenlämmössä. Samoin tarkkuus käyntiinlähtökuormituksen suuruusluokkaa olevilla kuormituksilla on heikko.

Käytännössä suurin ongelma sähköenergian mittaamisessa on mittamuuntajien virheellisen taakan aiheuttama virhe mittamuuntajien toisiovirtoihin ja -jännitteisiin. Erityisesti jännitemuuntajien taakat saattavat olla toisinaan hyvinkin pieniä.

Suojaustarkoituksiin käytettävien virtamuuntajien toimintaan ongelmia aiheuttava remanenssivuo ei aiheuta merkittävää ongelmia energian mittauksessa käytettävillä virtamuuntajilla. Normaalien kuormavirtojen aiheuttama vaihtomagnetointi on mittavirtamuuntajien tapauksessa niin suuri, että se demagnetoi tehokkaasti virtamuuntajan rautasydämen.

Ongelmista aiheutuvan sähköenergian mittaamiseen syntyvän virheen esiintyminen voidaan estää sopivilla toimenpiteillä:

Jännitteen ja virran yliaaltojen aiheuttama virhe voidaan poistaa käyttämällä staattista mittaria, jotka mittaavat oikein yliaaltojenkin sisältämän energian. Mittaustarkkuuden parantumisen lisäksi myös sähkön laatu paranee kun yliaaltoja suodatetaan. Myös loistehon kompensoiminen parantaa hieman sähköenergian mittaustarkkuutta, sillä mittarin mittaavat hieman tarkemmin suurella tehokertoimella. Tasakomponentin aiheuttaman virheen esiintyminen voidaan estää vain eliminoimalla tasakomponentti verkosta.

Mittarien lämpötilariippuvuudesta aiheutuvan virheen poistamiseksi mittari on edullista sijoittaa sisätiloihin silloin kun se vain on mahdollista. Mittarin toimintakunto pysyy hyvänä pitempään, jos mittari asennetaan pölyttömään tilaan tärinättömälle alustalle suoraan asentoon.

Mittamuuntajien valinnassa täytyy kiinnittää huomiota niiden muuntosuhteisiin ja kuormitettavuuksiin. Väärin valituilla mittamuuntajilla saadaan mittauksessa epätarkka tulos.

Jotta kaikkia osapuolia sähköenergian kaupassa kohdeltaisiin mittaustarkkuuden kannalta tasapuolisesti, olisi tärkeätä noudattaa tarkasti tämänkin opinnäytetyön perustana olevia sähköenergian mittausta käsitteleviä standardeja.

Lähdeluettelo:

- [1] SFS 3381. 1975. Vaihtosähköenergian mittaus. Mittauslaitteet. Suomen Standardisoimisliitto. 1975. 6 s.
- [2] IEC 521. 1988. Class 0,5 , 1 and 2 alternating-current watthour meters. International Electrotechnical Commission. 1988. 51 s.
- [3] IEC 687. 1980. Static watthour meters. Metrological specifications for classes 0,2 S and 0,5 S. International Electrotechnical Commission. 1980. 23 s.
- [4] IEC 1036. 1990. Alternating-current static watthour meters for active energy (classes 1 and 2). International Electrotechnical Commission. 1990. 43 s.
- [5] Enermet Oy. Sähköenergianmittauskurssi. Jyväskylä. 1992. 330 s.
- [6] Sherburne, R. R. Driving torque equations for the watthour meter based on the ferraris principle. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-90 (1971). 1. s. 325...330
- [7] Suomen Sähkölaitosyhdistys (SLY) r.y. Kehittyvä energianmittaus -seminaari. 1992.
- [8] Blatt, F. J. Physics of electronic conduction in solids. New York. 1968. McGraw-Hill. 446 s.
- [9] Hannah, N. R. & Pollock, M.R. The direct field sensor: a mature solid state metering technology. 6. international conference on metering apparatus and tariffs for electricity supply, Manchester, 3...5.4.1990. Lontoo, The Institution of Electrical Engineers. s. 102...106.
- [10] Mörsky, J. Relesuojaustekniikka. Espoo. 1992. Otatieto Oy. 459 s.
- [11] SFS 3109. Jännitemuuntajat. Suomen Standardisoimisliitto. 1983. 42 s.
- [12] SFS 2874. Virtamuuntajat. Suomen Standardisoimisliitto. 1983. 29 s.
- [13] Kuronen, P. Yliaallot ja niiden mittaaminen. Sähkölaitosten lisensiaattikurssi "Sähkölaitosten mittaustekniikka". TKK, Espoo. 1978.
- [14] Baghzouz, Y. & Tan, O.T. Harmonic analysis of induction watthour meter performance. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-104 (1985). 2. s. 399...406.

- [15] Baggott, A.J. The effect of waveshape distortion on the measurement of energy tariff meters. 3. international conference on metering apparatus and tariffs for electricity supply, Lontoo, 15...17.11.1977. Lontoo, The Institution of Electrical Engineers. s. 280...284.
- [16] Goldberg, S. & Horton, W.F. Induktion wattour meter accuracy with non-sinusoidal currents. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol PWRD-2 (1987). 3. s. 683...690.
- [17] Lester, G. & Gray, F.M. The effect of distorted waveforms on a sampling electronic polyphase meter. 6. international conference on metering apparatus and tariffs for electricity supply, Manchester, 3...5.4.1990. Lontoo, The Institution of Electrical Engineers. s. 76...79.
- [18] Emanuel, A.E. & Chandra, H.N. & Levitsky, F.J. Current transformer accuracy on asymmetrically triggered thyristorized circuits. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-99 (1980). 1. s. 92...98.
- [19] Aspnes, J.D & Merritt, R.P. Effect of DC-excitation on instrument transformers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-102 (1983). 11. s. 3706...3712.
- [20] Armanini, D. & Centemeri, A. Investigation on induction wattour meters subjected to fault currents in distribution networks. 3. international conference on metering apparatus and tariffs for electricity supply, London, 15...17.11.1977. Lontoo, The Institution of Electrical Engineers. s. 274...276.
- [21] Ohjeita sähköenergian mittauslaitteiden kunnon ja tarkkuuden valvonnasta. 2/89. Helsinki 1989. Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y. 30 s.
- [22] Bruce, R. G. & Wright, A. Remanent flux in current-transformer cores. Proc. IEE. Vol 113 (1966). 5. s. 915...920.
- [23] Connor, E. E. & Greb, R. G. & Wentz, E. C. Control of residual flux in current transformers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-92 (1973). 4. s. 1226...1233.
- [24] Anderson, R. P. A method of deriving overall accuracy for single phase wattour meters. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol PWRD-2 (1987). 2. s. 337...341.
- [25] Halonen, L. & Tetri, E. Pienloistelamppujen käyttömahdollisuudet sisä- ja ulkovalaistuksessa. Espoo 1991. TKK. 60 s.
- [26] Spälti, A. & Meierhofer, W. Analyse der fehler und Berechnung der Grenzen für die abnahmeprüfung von elektrizitätzähler. Archiv für technisches messen und industrielle messtechnik. Lieferung 416 (1970). 9. s. 105...116.

- [27] Milligan, J. W. Validity of I^2t extrapolation of damaging fault current in metering devices. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-94 (1975). 3. s. 977...982.
- [28] Emanuel, A. E. Current transformer performance with steady-state DC-biasing. IEEE Transactions on magnetics. Vol MAG-16 (1980). 5. s. 1278...1282.